

Eisenbahnbetriebswissen- schaftliche Konzepte zur Reduktion der Schallemissionen

Railway operating science concepts to reduce noise emissions
Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation von Dipl.-Ing. Sören Griese aus Bernau b. Berlin
Tag der Einreichung: 16.10.2018

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Bahnsysteme und
Bahntechnik

Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Konzepte zur Reduktion der Schallemissionen
Railway operating science concepts to reduce noise emissions

Vorgelegte Dissertation von Dipl.-Ing. Sören Griese aus Bernau b. Berlin

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Tag der Einreichung: 16.10.2018

Darmstadt – D18

Schriftenreihe der Institute für Verkehr
Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik

Heft B11

ISSN 1614-9300

Darmstadt 2018

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-87571

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/8757>

Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND 4.0 International

Kurzfassung

Durch den Verkehr werden Schallemissionen verursacht, vor denen die Menschen geschützt werden sollten. Vor dem Hintergrund einer kontinuierlichen Verkehrssteigerung ist in den kommenden Jahren von einer weiteren Zunahme der Emissionen und somit der Schallbelastung auszugehen. Gleichzeitig sind niedrigere Immissionsgrenzwerte zu erwarten. Neben den bestehenden Maßnahmen am Fahrweg und am Fahrzeug sollen daher weitere Möglichkeiten zur Schallreduktion erschlossen werden, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden.

Das Ziel der Arbeit ist es, betriebliche Maßnahmenarten zur Schallreduktion zu untersuchen. Dies schließt die Entwicklung von Maßnahmenarten, deren detaillierte Beschreibung und monetäre Bewertung mit verschiedenen Kriterien sowie die Ermittlung eines Nutzen-Kosten-Verhältnisses ein. Somit liegt eine Bewertung für den Einsatz und die Auswirkungen von betrieblichen Maßnahmenarten vor.

Mit der Ermittlung der Maßnahmenarten wird sichergestellt, dass nur die Maßnahmenarten untersucht werden, die weder zum Fahrweg noch zum Fahrzeug gehören. Mit Hilfe der Methoden Bottom-up und Top-down werden in der nachfolgenden Entwicklung der Maßnahmenarten diese weiter ausdetailliert. Das Ergebnis dieser Entwicklung sind insgesamt 32 generische Maßnahmenarten, welche unabhängig von Zeit, Ort und Einsatzdauer sind.

Mit der Grobbewertung erfolgt eine erste Einschätzung hinsichtlich der grundsätzlichen Eignung einer Maßnahmenart. Dadurch wird die Anzahl der Maßnahmenarten auf 10 reduziert, welche in der Arbeit weiter betrachtet werden. Das Schema der Grobbewertung umfasst die Kriterien Kosten, betriebliche Wirkung, Nutzen, Nutzen-Kosten-Verhältnis und Umsetzbarkeit.

Nachdem die weiter zu betrachtenden Maßnahmenarten detailliert beschrieben und das Schema zur detaillierten Bewertung der Maßnahmenart dargelegt wird, erfolgt deren Bewertung. Für jede Maßnahmenart werden mit dem Schema die Ausprägungen der oben genannten Kriterien monetär bewertet. Auf Basis dieser monetären Bewertung wird die Ermittlung des jeweiligen Nutzen-Kosten-Verhältnisses durchgeführt. Somit ist eine Vergleichbarkeit von mehreren Maßnahmenarten gegeben. Maßnahmenarten mit einem Nutzen-Kosten-Verhältnis von größer eins werden für einen wirtschaftlichen Einsatz empfohlen. Die monetäre Bewertung ist so gestaltet, dass sowohl Eisenbahninfrastruktur- als auch Eisenbahnverkehrsunternehmen diese verwenden können.

Zur abschließenden Validierung werden ausgewählte Maßnahmenarten mit realen Strecken- und Zugdaten untersucht.

Mit der vorliegenden Arbeit werden erstmals betriebliche Maßnahmenarten zur Schallreduktion umfassend untersucht, entwickelt, bewertet und validiert. Damit wird eine wichtige Voraussetzung zum Einsatz in der Praxis geschaffen, so dass zukünftig neben bestehenden Maßnahmen am Fahrweg und am Fahrzeug eine dritte Säule zur Schallreduktion geschaffen wird. Der Anwender erhält eine Unterstützung und Entscheidungsgrundlage für deren Auswahl und Einsatz im Schienenverkehr.



Abstract

Traffic causes noise emissions, which people should be protected from. Due to the continuous increase in traffic, noise reduction is necessary, since otherwise the noise load will continue to increase in the years ahead. At the same time, lower emission limits are expected. In addition to the existing measures on the track and on the vehicle, therefore, further possibilities for noise reduction are to be developed in order to meet the future requirements.

The aim of the work is to investigate operational measures for noise reduction. This includes the development of types of measures, their detailed description and monetary evaluation with different criteria and the determination of a benefit-cost ratio. Thus, an assessment of the use and impact of operational measures becomes available.

The determination of the types of measures ensures that only those types of measures are examined that are neither part of the infrastructure nor the vehicle. With the help of the methods bottom-up and top-down, they are further elaborated in the subsequent development of the types of measures. The result of this development is a total of 32 generic types of measures, which are independent of time, location and duration of use.

The basic assessment is a first assessment of the elementary suitability of a type of measure. This reduces the number of types of measures to 10, which are considered further in the work. The basic assessment scheme covers the criteria cost, operational impact, benefit, benefit-cost ratio and feasibility.

After the detailed description and the scheme for a detailed assessment of the type of measures, they are evaluated. For each type of measure, the values of the criteria above are assessed in monetary terms using the scheme. On the basis of this monetary valuation, the determination of the respective benefit-cost ratio is carried out. Thus, a comparability of several types of measures is given. Types of measures with a benefit-cost ratio of greater than one are recommended for economic use. The monetary valuation scheme is designed so that both railway infrastructure and operating companies can use it.

For final validation, selected types of measures are examined on a real route with real train data.

For the first time, operational measures for noise reduction are comprehensively investigated, developed, evaluated and validated. This creates an important prerequisite for use in practice, so that in future, in addition to existing measures on the infrastructure and on the vehicle, a third pillar for noise reduction can be created. The user receives a decision-making support for the selection and application of operational measures in rail transport.



Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andres Oetting für die Möglichkeit der Promotion am Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik und die Betreuung meiner Arbeit bedanken. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze für die Übernahme des Korreferats und die hilfreichen Anmerkungen zur Arbeit.

Ich möchte mich bei allen ehemaligen Kollegen der Institute für Verkehr für das familiäre Umfeld und die angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Ebenfalls gilt mein Dank den ehemaligen Kollegen am Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik für die intensiven Diskussionen und Anregungen zum Thema.

Die Erstellung einer solchen Arbeit wäre ohne die Unterstützung von vielen weiteren Personen nicht möglich. Da der Platz dafür hier nicht ausreicht, werde ich mich persönlich bedanken.

Finis coronat opus. – Zitat von Ovid.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Motivation zur Reduktion der Schallemissionen.....	2
1.3	Ziel der Arbeit.....	3
1.4	Weiteres Vorgehen.....	3
2	Stand der Forschung	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Maßnahmen am Fahrweg.....	5
2.2.1	Aktive Schallschutzmaßnahmen	6
2.2.2	Passive Schallschutzmaßnahmen.....	7
2.3	Maßnahmen am Fahrzeug	8
2.4	Maßnahmen im Luft- und Straßenverkehr und der Binnenschifffahrt	9
2.4.1	Luftverkehr	9
2.4.2	Straßenverkehr	11
2.4.3	Binnenschifffahrt	12
2.4.4	Vergleich der Verkehrsträger	12
2.4.5	Fazit.....	14
2.5	Betriebskonzept zur Reduktion von Schallemissionen	15
2.5.1	Einleitung	15
2.5.2	Begriff „Betriebskonzept“	15
2.5.3	Bestehende betriebliche Maßnahmen zur Schallreduktion	17
2.6	Zusammenfassung	17
3	Grundlagen	19
3.1	Einleitung	19
3.2	Schall.....	19
3.2.1	Grundlagen und Formeln	19
3.2.2	Bewertungen von Schallereignissen.....	22
3.2.3	Pegeländerung und Wahrnehmung	24
3.3	Emission	25
3.4	Transmission	26
3.5	Immission	26
3.6	Akteure.....	26
3.6.1	Einleitung	26
3.6.2	Betroffene.....	27
3.6.3	Bürgerinitiative.....	28
3.6.4	Bundesbehörden und Europäische Union	28

3.6.5	Deutsche Bahn AG.....	29
3.6.6	Eisenbahninfrastrukturunternehmen.....	30
3.6.7	Eisenbahnverkehrsunternehmen	31
3.6.8	Kommunen.....	32
3.6.9	Verbände.....	32
3.6.10	Wagenhalter.....	34
3.7	Rechtliche Grundlagen.....	35
3.7.1	Europäische Ebene	35
3.7.2	Nationale Ebene	36
3.8	Kapazität und Leistungsfähigkeit.....	38
3.9	Sperrzeit eines Blockabschnitts und Nennleistung	38
3.10	Kosten im System Bahn.....	40
3.11	Nutzen	45
3.12	Zusammenfassung.....	46
4	Aufgabenstellung und Lösungsansatz	47
4.1	Aufgabenstellung	47
4.2	Inhaltliche Abgrenzung	48
4.3	Definitionen im Sinne dieser Arbeit	48
4.3.1	Betriebskonzept.....	49
4.3.2	Maßnahmenart vs. Maßnahme.....	49
4.3.3	Strecke, Kante und Knoten	49
4.3.4	Wagen.....	50
4.3.5	Fahrzeug	50
4.3.6	Zug.....	50
4.4	Anforderungen	50
4.5	Methoden.....	51
4.6	Aufbau der Arbeit.....	52
5	Ermittlung und Entwicklung der Maßnahmenarten	53
5.1	Einleitung.....	53
5.2	Ermittlung der Maßnahmenarten.....	53
5.3	Entwicklung der Maßnahmenarten	53
5.3.1	Top-Down	54
5.3.2	Bottom-Up.....	54
5.4	Übersichtsbild zu den Maßnahmenarten	55
5.5	Dimensionen einer Maßnahmenart	58
5.5.1	Festlegung der Dimensionen	58
5.5.2	Maßnahmenadressat	59
5.5.3	Zeitliche Komponente	59
5.5.4	Örtliche Komponente	60
5.5.5	Ordnungsrechtliche Art der Durchsetzung	60

5.5.6	Planung und/oder Durchführung	62
5.6	Zusammenfassung	62
6	Entwicklung eines Schemas zur Grobbewertung	63
6.1	Einleitung	63
6.2	Schema zur Grobbewertung	63
6.2.1	Kosten.....	64
6.2.2	Betriebliche Wirkung	64
6.2.3	Nutzen	64
6.2.4	Nutzen-Kosten-Verhältnis	64
6.2.5	Umsetzbarkeit.....	66
6.3	Zusammenfassung	67
7	Beschreibung der Maßnahmenarten	69
7.1	Einleitung	69
7.2	Einheitlicher Steckbrief.....	69
7.2.1	Beschreibung	69
7.2.2	Kosten.....	69
7.2.3	Betriebliche Wirkung	69
7.2.4	Nutzen	70
7.2.5	Umsetzbarkeit.....	70
7.2.6	Grobbewertung.....	70
7.3	Maßnahmenarten	70
7.4	Änderung der Zugcharakteristik	71
7.4.1	Änderung des Triebfahrzeuges	71
7.4.2	Änderung des Wagenzuges.....	72
7.5	Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg	74
7.5.1	Fahrzeitveränderung	75
7.5.2	Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume	79
7.6	Änderung des Laufwegs.....	80
7.7	(Teil-)Ausfall	81
7.8	Zusammenfassung	82
8	Grobbewertung der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten	83
8.1	Einleitung	83
8.2	Methode	83
8.3	Ergebnisse	84
8.4	Zusammenfassung	85
9	Entwicklung eines Schemas zur detaillierten Bewertung	87
9.1	Einleitung	87

9.2	Kosten	87
9.2.1	Einleitung.....	87
9.2.2	Kostenarten eines EIU	88
9.2.3	Kostenarten eines EVU	96
9.3	Betriebliche Wirkung.....	109
9.3.1	Einleitung.....	109
9.3.2	Nennleistung	109
9.3.3	Mittelbare Erlösminderungen EIU	111
9.3.4	Mittelbare Erlösminderungen EVU	111
9.4	Nutzen	119
9.4.1	Einleitung.....	119
9.4.2	Vorgehen.....	119
9.4.3	Berechnungsformeln	120
9.4.4	Beispiele	122
9.5	Umsetzbarkeit	124
9.6	Kombinationsmöglichkeiten	126
9.7	Zusammenfassung.....	127
10 Detaillierte Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten		129
10.1	Einleitung.....	129
10.2	Einflussgrößen	130
10.2.1	Beispielstrecke und Betriebsprogramm	130
10.2.2	Berechnung der mittleren Mindestzugfolgezeiten und Pufferzeit.....	133
10.2.3	Berechnung des Schallpegels nach Schall 03.....	138
10.3	Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten.....	139
10.3.1	Änderung des Wagenzuges	139
10.3.2	Fahrzeitveränderung	143
10.3.3	Umleitung	173
10.4	Zusammenfassung.....	176
11 Detaillierte Bewertung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten		177
11.1	Einleitung.....	177
11.2	Methode.....	177
11.3	Ergebnisse	177
11.4	Zusammenfassung.....	179
12 Beispielhafte Untersuchung der Maßnahmenarten		181
12.1	Einleitung.....	181
12.2	Auswahl der realen Strecke	181
12.3	Strecke Bebra ↔ Fulda.....	182
12.4	Eigenschaften der Zugfahrt	182
12.5	Auswahl der Maßnahmenarten	183

12.5.1	Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Bremsen und keine...	184
12.5.2	Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung.....	185
12.5.3	Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschw.-profil.....	187
12.6	Ergebnisse	189
12.7	Zusammenfassung	190
13 Zusammenfassung und Ausblick		191
13.1	Zusammenfassung	191
13.2	Ausblick.....	192
Verzeichnisse		193
	Literaturverzeichnis	193
	Abbildungsverzeichnis	207
	Tabellenverzeichnis	209
Anlagen		I
Anlage 1:	Maßnahmenarten aus Brainstorming.....	III
Anlage 2:	Maßnahmenarten mit jeweiligen Unter- und Oberthemen.....	V
Anlage 3:	Steckbriefe: Änderung des Triebfahrzeuges	VII
Anlage 4:	Steckbriefe: Änderung des Wagenzuges.....	XIII
Anlage 5:	Steckbriefe: Fahrzeitveränderung	XXIII
Anlage 6:	Steckbrief: Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume.....	XLIX
Anlage 7:	Steckbriefe: Änderung des Laufwegs	LIII
Anlage 8:	Steckbriefe: (Teil-)Ausfall	LVII
Anlage 9:	Grobbewertung der Maßnahmenarten.....	LXI
Anlage 10:	Mittlere Mindestzugfolgezeiten, mittlere Folgeverspätungen und Nennleistungen	LXV
Anlage 11:	Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Wagen.....	LXXIII
Anlage 12:	Fahrzeitveränderung – Beschleunigen – geringere Beschleunigung	LXXVII
Anlage 13:	Fahrzeitveränderung – Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})....	LXXIX
Anlage 14:	Fahrzeitveränderung – Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen.....	LXXXIII
Anlage 15:	Fahrzeitveränderung – Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})	LXXXVII
Anlage 16:	Fahrzeitveränderung – Auslaufen – Auslaufen nutzen	XCI
Anlage 17:	Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung	XCV
Anlage 18:	Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben	XCVII
Anlage 19:	Geschwindigkeitsprofil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung	CIII
Anlage 20:	Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots	CV
Anlage 21:	Steckbriefe der realen Strecken	CVII
Schriftenverzeichnis		CIX
Studentische Arbeiten		CXI

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Der Verkehr im Allgemeinen und der Schienenverkehr im Speziellen sind für den Standort Deutschland von großer Wichtigkeit. Die Vorhaltung einer leistungsfähigen Infrastruktur ist dabei die Voraussetzung zur Durchführung der Verkehre. Davon profitieren die Unternehmen, die Personen und Güter auf der Schiene transportieren. Als Beispiele können hier die Automobil-, Montan- und chemische Industrie genannt werden. Teilweise werden komplette Transportketten mit der Eisenbahn durchgeführt. Aufgrund der zu transportierenden Menge kommt dafür bei bestimmten Gütern auch kein anderer Verkehrsträger in Frage.

Die Durchführung der Verkehre und der Transport der Güter sind dabei stets mit Schallemissionen und Schallimmissionen verbunden. Die Bevölkerung sollte vor diesen, teilweise gesundheitsschädlichen, Umwelteinflüssen geschützt werden (UBA 2017a). Die Weltgesundheitsorganisation legt in einem Bericht von 2011 detailliert dar, welche Zusammenhänge es zwischen dem Schall und bestimmten Erkrankungen gibt. Des Weiteren werden im Bericht die durch die Lärmbelastung verloren gegangenen Lebensjahre (DALYs - disability adjusted life years) ermittelt (WHO 2011).

Von den drei existierenden Schienenverkehrsarten verursacht der Schienengüterverkehr tendenziell die höchsten Schallemissionen (BMVI 2016a). Dies hat auch die Bundesregierung der 18. Legislaturperiode erkannt und daher im Koalitionsvertrag vorgesehen, dass „ordnungsrechtliche Maßnahmen auf stark befahrenen Güterstrecken“ umgesetzt werden, wenn nicht bis zum Jahr 2016 „mindestens die Hälfte der in Deutschland verkehrenden Güterwagen umgerüstet“ sind (Bundesregierung 2013). Des Weiteren wurde das Schienenlärmschutzgesetz (SchlärmschG) verabschiedet, welches faktisch den Einsatz lauter Güterwagen verbietet (Deutscher Bundestag 2017a).

Abgesehen von den ordnungsrechtlichen Maßnahmen können die Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen in drei Maßnahmengruppen zusammengefasst werden. Diese leiten sich aus den technischen Systemkomponenten (Komponenten Fahrzeug und Infrastruktur mit Bindeglied Betrieb) her (Janicki 2011). In zwei Gruppen (Maßnahmen am Fahrweg und Maßnahmen am Fahrzeug) werden bereits Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen angewendet. Da diese bereits weitgehend erforscht sind und umgesetzt werden, sind hier weitere Innovationen nicht zu erwarten (BMVI 2016a), (Deutsche Bahn AG 2016), (UBA 2017a).

Die dritte Gruppe der betrieblichen Maßnahmen wurde bisher kaum erforscht, sodass wenige Aussagen bezüglich einer Schallreduktion vorliegen. Die Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 70 km/h würde „zu zehn Prozent höheren Transportkosten, einer Reduzierung des Transportaufkommens um 30 Prozent und eine Beförderungszeitverlängerung von rund einem Viertel führen“ (VIA Consulting & Development GmbH und Railistics GmbH 2014). Auch die Einführung eines Nachtfahrverbotes würde „den Schienengüterverkehr in seiner Existenz bedrohen. Eine Verschiebung der Schienentransporte in den Tag ist angesichts über 90- prozentiger Auslastung vieler Trassen undenkbar. Die Verteuerung der Transporte und eine Verlängerung der Beförderungszeit hätten voraussichtlich eine massive Verlagerung von Transporten weg von der Schiene zur Folge“ (VDV 2014). Diese zwei extremen Beispiele zeigen die Auswirkungen von betrieblichen Maßnahmen. Kloepfer et al. (2006) bezeichnet Lärm als eine „Externalität von Verkehr [...], die nie vollständig beseitigt werden kann. Die wirtschaftspolitische Frage kann deshalb nur darum gehen, um wie viel der Lärm reduziert werden soll, und nicht darum, ob er vollkommen vermieden werden soll“ (Kloepfer et al. 2006).

Neben den genannten Unternehmen, die ihre Güter auf der Schiene transportieren, existieren weitere Unternehmen, die über den Verkauf ihrer Produkte ein Wachstumsprinzip verfolgen und eine Gewinnmaximierung erreichen wollen. Dazu gehören Eisenbahninfrastruktur- und Eisenbahnverkehrsunternehmen, die mit der Durchführung von Verkehren Einnahmen generieren, um einen wirtschaftlichen Vorteil zu erlangen.

Abgesehen von den wirtschaftlichen Aspekten muss die Daseinsvorsorge sichergestellt werden. Dies wird mit der Durchführung des Schienenpersonennahverkehrs gewährleistet. Die Daseinsvorsorge dient dazu, dass „eine ausreichende Bedienung der Bevölkerung mit Verkehrsleistungen im öffentlichen Personennahverkehr [gewährleistet ist]“ (Bundesrepublik Deutschland 2016e). Die Länder und der Bund müssen also dafür sorgen, dass ein ausreichendes Angebot für die Bevölkerung zur Verfügung steht. Dieses wird von Millionen Pendlern und anderen Nutzergruppen tagtäglich in Anspruch genommen.

Das Ziel der DB AG, bis 2020 eine Halbierung des Lärms zu erreichen, „wird mit den beiden Säulen Umrüstung der Güterwagen und der Umsetzung des Lärmsanierungsprogramms, sicher erreicht werden. Darüber hinaus sind jedoch weitere Maßnahmen notwendig, um den Lärmschutzanforderungen [...] zu entsprechen.“ (Asmussen et al. 2016)

Findet keine weitere Reduktion der Schallemissionen statt, ist davon auszugehen, dass vor allem der Schienengüterverkehr in seinem jetzigen Umfang langfristig nicht mehr durchgeführt werden kann. Im Jahr 2013 wurde festgestellt: „Lärm ist insbesondere auch die ökologische Achillesferse des klimafreundlichen, energiesparenden und sicheren Schienengüterverkehrs“ (VDI und VPI 2013).

Aufgrund der wirtschaftlichen Situation werden im Schienengüterverkehr bisher hauptsächlich wenig hochwertige Wagen und Bremssysteme eingesetzt. Dies hat zur Folge, dass er tendenziell die höchsten Schallemissionen verursacht (s. o.). Eine Umrüstung der Wagen und Bremssysteme wird von den beteiligten Unternehmen nicht freiwillig durchgeführt, da mit dieser enorme finanzielle Aufwendungen verbunden sind (UBA 2017a), (VDI und VPI 2013).

1.2 Motivation zur Reduktion der Schallemissionen

Die Motivation zur Reduktion der Schallemissionen liegt darin begründet, dass trotz des Einsatzes von Maßnahmen am Fahrweg und Maßnahmen am Fahrzeug weiterhin ein Reduktionsbedarf zwischen 10 und 15 dB(A) besteht (UBA 2017a). Diese Reduktion könnte mit der Anwendung von betrieblichen Maßnahmen erreicht werden. Kloepfer et al. (2006) führt aus: „Lärmoptimale Betriebsweisen beruhen darauf, den Verkehr so auszuführen, dass minimale Lärmemissionen entstehen. Dies steht aber in direktem Konflikt mit betriebswirtschaftlichen und gesamtwirtschaftlichen Erwägungen. Ein lärmoptimaler Schienenverkehr würde bedeuten, dass nachts kein Verkehr stattfindet und tagsüber die Geschwindigkeiten reduziert werden. Beide Varianten sind wirtschaftlich nicht in reiner Form vertretbar. Die schon knappe Trassenkapazität würde weiter verringert werden [...]“ (Kloepfer et al. 2006).

Im Rahmen dieser Arbeit werden betriebliche Maßnahmenarten untersucht, um daraus das Potenzial der Schallreduktion abzuleiten. Damit soll die Akzeptanz des Schienenverkehrs im Allgemeinen und des Schienengüterverkehrs im Speziellen auch zukünftig sichergestellt werden. Sollte dies nicht erreicht werden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass zunehmend mehr Güter auf andere Verkehrsträger verlagert werden.

Durch eine kontinuierliche Steigerung der Verkehre werden nicht nur weitere Schallemissionen generiert, sondern auch der Fahrweg und die Fahrzeuge erhöhten Belastungen ausgesetzt. Dies hat zur Folge, dass u. a. die Instandhaltung öfter erfolgen muss und dadurch weitere Emissionen

entstehen. Zu beachten ist hierbei auch, dass die Bundesregierung eine Verlagerung des Verkehrs von der Straße auf die Schiene weiter vorantreibt und somit die Schiene als „grünen“ Verkehrsträger weiter ausbauen möchte. Sowohl die Steigerung als auch die Verlagerung der Verkehre führen zu einer Steigerung der Emissionen. Diese können mit Betriebskonzepten reduziert werden. Neben der oben beschriebenen Akzeptanz des Schienenverkehrs kann mit einer weiteren Reduktion der Schallemissionen die Gesundheit der Betroffenen geschont und erhalten werden.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist es, betriebliche Maßnahmenarten zur Schallreduktion zu untersuchen. Die Untersuchung umfasst dabei die monetäre Bewertung verschiedener Kriterien beim Einsatz einer Maßnahmenart.

Einem Anwender werden Informationen über mögliche betriebliche Maßnahmenarten, die einerseits zu einer weiteren Reduktion der Schallemissionen beitragen und andererseits den Betrieb weiterhin gewährleisten, vermittelt und ihm somit eine Unterstützung gegeben. Die so vorliegenden Maßnahmenarten können zur Lösung des „Lärm-Problems“ beitragen.

1.4 Weiteres Vorgehen

Um das Ziel der Arbeit zu erreichen, werden im folgenden Kapitel 2 im Rahmen einer Literaturrecherche die bereits vorhandenen Maßnahmenarten am Fahrweg und am Fahrzeug von den betrieblichen Maßnahmenarten abgegrenzt. Dabei erfolgt auch die Betrachtung der anderen Verkehrsträger und es wird geprüft, ob sich deren Maßnahmenarten auf den Schienenverkehr übertragen lassen. Um die Schallreduktion bei Anwendung einer Maßnahme berechnen zu können, werden in Kapitel 3 die Grundlagen und Formeln dargestellt. In Kapitel 4 ist die Aufgabenstellung der Arbeit beschrieben.



2 Stand der Forschung

2.1 Einleitung

An Maßnahmen zur Reduktion des Schalls unterscheiden Kloepfer et al. (2006) und das Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (2016) folgende drei Arten:

- a) Verkehrsvermeidung / Verkehrsverringerng / Verkehrs[um]lenkung
- b) Lärmreduktion am Verkehrsmittel
- c) Lärmschutz bei dem Betroffenen / passiver Lärmschutz

Aus der Aufzählung werden drei Maßnahmengruppen abgeleitet: planerische Maßnahmen (a), Maßnahmen am Fahrweg und Fahrzeug (b) und Maßnahmen bei den Betroffenen (c).

Die planerischen Maßnahmen werden mit den betrieblichen Maßnahmen (siehe Kapitel 1) gleichgesetzt. Die Unterteilung nach Maßnahmen am Fahrweg und Fahrzeug wird für den Überblick über den Stand der Forschung verwendet.

Die Maßnahmen bei den Betroffenen werden bei den Maßnahmen am Fahrweg und den Maßnahmen der anderen Verkehrsträger genannt.

Die ebenfalls in Kapitel 1 genannten ordnungsrechtlichen Maßnahmen werden im Rahmen der Arbeit nicht als eigenständige Maßnahmengruppe untersucht.

Somit werden in den Kapiteln 2.2 („Maßnahmen am Fahrweg“) und 2.3 („Maßnahmen am Fahrzeug“) bestehende Maßnahmen des Schienenverkehrs genannt und die Abgrenzung zu den planerischen Maßnahmen dargelegt. Die Maßnahmen der anderen Verkehrsträger werden in Kapitel 2.4 („Maßnahmen im Luft- und Straßenverkehr und der Binnenschifffahrt“) kurz erläutert. Die Maßnahmen bei den Betroffenen werden in den Kapiteln 2.2 und 2.4 erwähnt. Da der Begriff des Betriebskonzeptes bisher nicht in Verbindung mit der Reduktion von Schallemissionen verwendet wird, wird in Kapitel 2.5 („Betriebskonzept zur Reduktion von Schallemissionen“) der Begriff dargelegt und damit ebenfalls die Abgrenzung zu den o. g. Maßnahmen erreicht.

2.2 Maßnahmen am Fahrweg

Die Deutsche Bahn AG unterscheidet bei den Maßnahmen am Fahrweg die aktiven und passiven Schallschutzmaßnahmen (BMVI 2016a). Sie unterteilt die Maßnahmen gemäß Abbildung 2-1. Dabei zählen zu den aktiven Maßnahmen alle baulichen Maßnahmen, die dort wirken, wo der Schall entsteht (Emissionsort) oder sich auf dem Ausbreitungsweg des Schalls befinden. Als passive Maßnahmen werden alle Maßnahmen bezeichnet, die zur schalltechnischen Verbesserung an Gebäuden (Immissionsort) beitragen (Deutsche Bahn AG 2017a).

Es kann festgestellt werden, dass der Einsatz der Maßnahmen am Fahrweg mit erheblichen Kosten und Aufwänden verbunden ist (DB Netz AG 2012). So muss zur Umsetzung dieser Maßnahmen stets eine Planung und Bautätigkeit erfolgen.

Maßnahmen zur Lärminderung

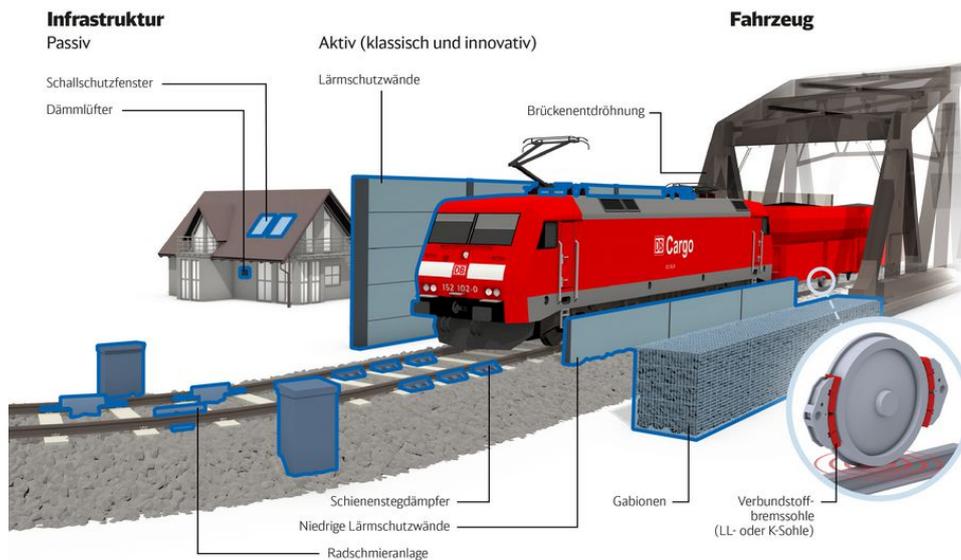


Abbildung 2-1: Aktive und passive Schallschutzmaßnahmen (Deutsche Bahn AG 2017a)

Die bestehenden aktiven und passiven Schallschutzmaßnahmen werden im Folgenden kurz beschrieben.

2.2.1 Aktive Schallschutzmaßnahmen

Zu den aktiven Maßnahmen zählen z. B. Schallschutzwände, Schienenstegdämpfer oder Schienenschmieranlagen. Der Einsatz dieser Maßnahmen hängt stark von den örtlichen Verhältnissen ab. In Tabelle 2-1 sind für ausgewählte Maßnahmen die jeweiligen Minderungspotenziale und die jeweiligen Kosten pro dB(A) Lärminderung und Jahr sowie Infrastruktur-km dargestellt.

Tabelle 2-1: Minderungspotenzial und Kosten der Lärminderung durch technische Maßnahmen an der Infrastruktur (Kosten pro dB(A) Lärminderung und Jahr und Infrastruktur-km) durch Maßnahmen an der Infrastruktur (BMVI 2015a), (UBA 2017a)

Maßnahme	Minderungspotenzial [dB(A)]	Kosten pro Jahr [Euro/dB(A)]
Besonders überwachtetes Gleis (BüG)	0,7 – 3,3	800 (3 dB(A) Minderung)
Schienenschmieranlage	ca. 5	2.600
Gabionenwände, 4 – 5 m hoch	ca. 10	5.980
Niedrige Schallschutzwand	3 – 6	6.600 (4 dB(A) Minderung)
Schienenstegdämpfer	3	8.200
Schallschutzwand Beton, 6 m hoch	10 – 15	10.000

Aus obiger Tabelle geht hervor, dass eine Schallschutzwand aus Beton die höchsten Kosten pro Jahr aufweist. Gleichzeitig wird aber auch das größte Minderungspotenzial mit bis zu 15 dB(A) erreicht.

Das besonders überwachte Gleis weist die geringsten Kosten und ein vergleichsweise kleines Minderungspotenzial auf. Ein ähnliches Potenzial wird für Schienenstegdämpfer angegeben. Hier liegen die Kosten aber viel höher als beim besonders überwachten Gleis. Die übrigen Maßnahmen liegen sowohl bei den Kosten als auch dem Minderungspotenzial zwischen einer Schallschutzwand aus Beton und dem besonders überwachten Gleis.

Die in UBA (2017a) genannten aktiven Schallschutzmaßnahmen sind fast alle durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) zugelassen und werden angewendet. Somit ergeben sich keine Zeitverzögerungen bei der Anwendung einer Maßnahme durch eine Zulassung. Zwischen den verschiedenen Maßnahmen, z. B. niedrige Schallschutzwand und Schallschutzwand Beton, ergeben sich aber große Unterschiede hinsichtlich der Dauer bis zur Umsetzung vor Ort.

In Österreich, Frankreich und der Schweiz werden gleiche bzw. ähnliche Maßnahmen mit vergleichbaren Minderungspotenzialen ein- und umgesetzt. (BMLFUW 2007), (SNCF 2015), (BAV 2016), (BAFU 2018)

Je nach örtlichen Gegebenheiten und Auslastung der Infrastruktur können aktive Schallschutzmaßnahmen nicht umgesetzt werden, sodass auf passive Schallschutzmaßnahmen zurückgegriffen werden muss.

2.2.2 Passive Schallschutzmaßnahmen

Zu den passiven Maßnahmen zählen z. B. Schallschutzfenster, Dämmlüfter und die Dämmung von Außenwänden. Schallschutzfenster können eine Pegelminderung von bis zu 40 dB(A) erreichen (BMVI 2016a). „Die Dämmwirkung von Wänden liegt in der Regel über 50 dB(A)“ (BMVI 2016a).

In Tabelle 2-2 sind beispielhafte Kosten für ein Standardfenster je Schallschutzklasse angegeben.

Tabelle 2-2: Kosten für ein Standardfenster je Schallschutzklasse (Kloepfer et al. 2006)

Schallschutzklasse	Schalldämm-Maß [dB]	Kosten Standardfenster [€]
0	≤ 24	191,40
1	25 – 29	208,80
2	30 – 34	229,82
3	35 – 39	254,62
4	40 – 44	255,72
5	45 – 49	302,35
6	50	k. A.

Hinsichtlich der Dauer bis zur Umsetzung ergeben sich auch hier Unterschiede zwischen den jeweiligen Maßnahmen. Der Einbau eines Dämmlüfters kann in relativ kurzer Zeit erfolgen. Demgegenüber nimmt der Einbau eines Schallschutzfensters mehr Zeit in Anspruch. Die Dämmung von Außenwänden ist sehr aufwendig und nimmt von den drei genannten Maßnahmen am meisten Zeit in Anspruch.

In Österreich, Frankreich und der Schweiz werden gleiche bzw. ähnliche Maßnahmen mit vergleichbaren Minderungspotenzialen ein- und umgesetzt. (BMLFUW 2007), (SNCF 2015), (BAV 2016), (BAFU 2018)

Der Einsatz der passiven Schallschutzmaßnahmen hängt ebenso vom Ort und dessen Gegebenheiten ab. Unter Umständen können die Maßnahmen nicht umgesetzt werden, da eine bauliche Veränderung (z. B. denkmalgeschützte Gebäude) nicht möglich ist.

2.3 Maßnahmen am Fahrzeug

Neben den genannten aktiven und passiven Schallschutzmaßnahmen existiert eine große Anzahl von Maßnahmen, die am Fahrzeug umgesetzt werden können. Im Schienenverkehr kann zwischen Maßnahmen an Triebfahrzeugen und an Wagen unterschieden werden. An einem Triebfahrzeug können z. B. Einhausungen für besonders laute Komponenten des Motors vorgesehen werden. An Wagen können z. B. LL-Sohlen in der Bremsanlage oder Schürzen vor den Rädern angebracht werden (BMVI 2016a). In Tabelle 2-3 sind für ausgewählte Maßnahmen die jeweiligen Minderungspotenziale dargestellt.

Tabelle 2-3: Minderungspotenzial durch Maßnahmen am Fahrzeug (UBA 2017a), (Voith 2012)

	Maßnahme	Minderungspotenzial [dB(A)]
Maßnahmen am Triebfahrzeug	Optimierte Schaufelform	6 – 10
	Lärmoptimiertes Getriebe	5
	Schraubenkompressor	5 – 10
	Absorberjalousien am Kühleinlass und –auslass	5
Maßnahmen am Wagen	Schallschürzen am Drehgestell	1 – 2
	Schallschürzen am Radsatz	2
	Radschallabsorber	ca. 2,5

Auch diese Maßnahmen sind mit erheblichen Kosten und Aufwänden verbunden (DB Umweltzentrum 2014). In Tabelle 2-4 sind für ausgewählte Maßnahmen die jeweiligen Kosten pro dB(A) Lärminderung und Jahr sowie Wagen dargestellt.

Tabelle 2-4: Kosten Lärminderung durch technische Maßnahmen an Lokomotive und Güterwagen (Kosten pro dB(A) Lärminderung und Jahr und Lokomotive/Güterwagen) (UBA 2017a)

	Maßnahme	Kosten pro Jahr [Euro/dB(A)]	
		Neuwagen	Umrüstung
Maßnahmen an Lokomotive	Optimierte Schaufelform	4	50
	Lärmoptimiertes Getriebe	20	250
	Schraubenkompressor	70	70
	Absorberjalousien am Kühleinlass und –auslass	150	170
Maßnahmen am Güterwagen	Schallschürzen am Drehgestell	105	105
	Schallschürzen am Radsatz	110	110
	Radschallabsorber	280	280

Auch hier ergeben sich erhebliche Unterschiede zwischen den jeweiligen Maßnahmen hinsichtlich der jeweiligen spezifischen Dauer bis zur Umsetzung. So existieren Maßnahmen, die keine Zulassung seitens des EBA benötigen (z. B. Absorberjalousien) oder zugelassen sind und angewendet werden (z. B. Radschallabsorber). Entsprechend ergibt sich eine kurze Dauer bis zur Umsetzung. Demgegenüber existieren Maßnahmen als Prototyp (z. B. Schallschürzen am Radsatz), die zunächst durch das EBA zugelassen werden müssen und erst dann angewendet werden können. (UBA 2017a)

In Österreich, Frankreich und der Schweiz werden gleiche bzw. ähnliche Maßnahmen mit vergleichbaren Minderungspotenzialen ein- und umgesetzt. (BMLFUW 2007), (SNCF 2015), (BAV 2016), (BAFU 2018)

2.4 Maßnahmen im Luft- und Straßenverkehr und der Binnenschifffahrt

Neben den genannten Maßnahmen am Fahrweg und am Fahrzeug im Schienenverkehr kommen auch bei anderen Verkehrsträgern Maßnahmen zur Schallreduktion zum Einsatz. Zum besseren Verständnis sind diese nachfolgend kurz dargestellt.

2.4.1 Luftverkehr

Im Luftverkehr wird für die kommenden Jahre ebenfalls ein Wachstum vorausgesagt (Kloepfer et al. 2006). Dadurch wird es auch zu einer erhöhten Schallbelastung kommen. „Nach Auffassung von Experten beträgt das erschließbare Potenzial gemessen am Stand bester Praxis – etwa zehn bis zwölf dB (vgl. EU-SRA), das zum überwiegenden Teil durch Einführung geräuscharmer Flugzeug- und Triebwerkskonfigurationen und zum kleineren Teil durch Anwendung geräuschoptimierter Start- und Landeverfahren verwirklicht werden kann“ (Kloepfer et al. 2006).

Die ICAO hat vier Hauptelemente zur Reduzierung des Fluglärms festgelegt:

- Lärmreduzierung an der Quelle (z. B. Triebwerke, Flügel und Flugzeugzelle)
- Lokale Maßnahmen am Flughafenumfeld (z. B. passiver Schallschutz und lärmabhängige Start- und Landeentgelte)
- Lärmmindernde Verfahren in der Luft und am Boden (z. B. kontinuierlicher Sinkflug und satellitengestützte Anflugverfahren)
- Lärmbedingte Betriebsbeschränkungen (z. B. restriktive Betriebszeiten) (ICAO 2004)

Zu den lärmbedingten Betriebsbeschränkungen zählen u. a. Lärmquoten und restriktive Betriebszeiten an deutschen Flughäfen (ICAO 2004), (BDL 2016). Dies „sind nur als letztes Mittel einzusetzen, wenn die Summe der anderen Maßnahmen nicht zu einer akzeptablen Verringerung der Fluglärmbelastung führt“ (BDL 2016).

Mensen (2007) und Ashford et al. (2013) nennen weitere betriebliche Maßnahmen zur Minderung der Geräuschbelastung:

- zeitliche Beschränkungen des Flugbetriebs (Nachtflugbeschränkungen)
- Noise Preferential Runways mit längeren Rollwegen (möglichst Vermeidung des Überflugs über bebauten Gebiete)
- Rücken- bzw. Querwind-Starts
- Nutzungsbeschränkungen der verfügbaren Start-/Landebahnen
- Begrenzung der Anzahl der Flugbewegungen (Flugbewegungskontingente)

Kloepfer et al. (2006) und DLR (2007) nennen die in Tabelle 2-5 dargestellten kurz- bis langfristigen Lärminderungspotenziale im Luftverkehr.

Tabelle 2-5: Kurz- bis langfristige Lärminderungspotenzial im Luftverkehr ((Kloepfer et al. 2006), (DLR 2007))

	Kurzfristig (3-5 Jahre)	Mittelfristig (5-10 Jahre)	Langfristig (15-20 Jahre)
Umsetzung	- Modifikation an Triebwerk und Zelle	- Lärmarme Vorflügel und Klappen - Aktive/passive Lärminderung - Lärmarmen An- und Abflug	- „design-to-noise“-Flugzeug Konfiguration - Getriebfan
Potenzial	2-3 dB(A)	5-6 dB(A)	10-12 dB(A)

Das Nationale Verkehrslärmschutzpaket nennt folgende Maßnahmen im Luftverkehr:

- Novelle Fluglärmgesetz
 - Ausweitung des Anwendungsbereichs des Fluglärmgesetzes
 - Modernisierung des Berechnungsverfahrens
 - Absenkung der Grenzwerte für die Schutzzonen-Festlegung bei Verkehrsflughäfen
 - Absenkung der Grenzwerte für die Schutzzonen-Festlegung bei Militärflugplätzen unter Berücksichtigung der Unterschiede zwischen zivilem und militärischem Flugbetrieb
 - Verbesserung des Schutzes der Nachtruhe (Nachtschutzzonen an Flughäfen mit Nachtflugbetrieb, Nachtflugbeschränkungen)
 - Weitergehende Regelungen für den Neubau und die wesentliche Änderung von Flugplätzen
 - Verbesserung der luftverkehrsrechtlichen Vorschriften – stärkere Bürgerbeteiligung
- Fluglärmschutzverordnungen
 - Errichtung von schutzbedürftigen Einrichtungen und Wohnungen in dem Lärmschutzbereich (LSB) eines Flugplatzes
 - Erstattung von Aufwendungen für bauliche Schallschutzmaßnahmen an schutzbedürftigen Einrichtungen und Wohnungen
- Lärmarmes Anflugverfahren
- Bonusliste und lärmabhängige Landeentgelte (BMVBS 2009)

In Österreich, Frankreich und der Schweiz werden gleiche bzw. ähnliche Maßnahmen mit vergleichbaren Minderungspotenzialen ein- und umgesetzt. (BMLFUW 2007), (BAFU 2018)

2.4.2 Straßenverkehr

Die Schallbelastung im Straßenverkehr setzt sich aus den Motor- und Antriebsgeräuschen und den Reifen-Fahrbahngeräuschen zusammen (BASt 2012). Dies sind ähnliche Geräusche, die auch im Schienenverkehr auftreten. Dadurch ähneln sich auch die möglichen Maßnahmen zur Schallreduktion in beiden Verkehrsträgern. Durch z. B. „neue und optimierte Bauweisen des Fahrbahnobers [können] bereits bei der Entstehung [die Schallemissionen] deutlich [reduziert werden]“ (BMVBS 2012). Mit dem Einbau von offenporigem Asphalt können Minderungen zwischen 3 und 7 dB(A) erreicht werden (BASt 2012), (UBA 2004). Mit anderen lärmarmen Asphaltdeckschichten sind Minderungen zwischen 2 und 5 dB(A) möglich (Donner und Dudenhöfer 2009). Werden zwischen Fahrbahnübergängen (z. B. Brücken) lärmoptimierte Rautenelemente verbaut, ist dort eine Schallreduktion von 4 bis 7 dB(A) möglich (BASt 2012).

Demgegenüber kann durch geräuschreduzierende Reifen eine Schallreduktion von ca. 3,5 dB(A) erreicht werden (BASt 2012).

Durch eine Kapselung der Motorgeräusche beträgt das Minderungspotenzial ca. 4 bis 5 dB(A) (Pkw) und ca. 3 dB(A) (Lkw). Durch eine Vergrößerung der Ansaug- und Abgasschalldämpfer kann eine weitere Reduktion erreicht werden. (Kloepfer et al. 2006)

Neben den genannten technischen und baulichen Maßnahmen zur Schallreduktion können z. B. auch folgende betriebliche Maßnahmen zur Anwendung kommen:

- Tempo-30-Zonen
- uhrzeitabhängige Geschwindigkeitsbegrenzungen (z. B. 22:00 – 06:00 Uhr)
- Netz- und Streckenbeeinflussung
- temporäre Seitenstreifenfreigabe (z. B. zu Hauptverkehrszeiten)
- Fahrstreifensignalisierung
- Zuflussregelung
- Baustellenmanagement (z. B. Zu- und Anlieferung und Arbeitszeiten)
- Information der Verkehrsteilnehmer über Reisezeiten, Baustellen und Störungen (Hessen Mobil 2014)

Die Zeit zwischen 22:00 und 06:00 Uhr wird auch in der Straßenverkehrsordnung genannt und dort als Nachtzeit bzw. Nachtruhe bezeichnet. Sollten in dieser Zeit Veranstaltungen mit Kraftfahrzeugen stattfinden, die die Nachtruhe stören könnten, bedürfen sie einer Erlaubnis. Weiterhin sind „unnötiger Lärm und vermeidbare Abgasbelastungen verboten.“ Dies wird indirekt auch durch das Sonntagsfahrverbot erreicht. (Schurig und Wagner 2001)

Die Wirksamkeit der genannten Maßnahmen hängt stark vom individuellen Nutzerverhalten der Verkehrsteilnehmer ab.

Das Nationale Verkehrslärmschutzpaket nennt folgende weitere Maßnahmen im Straßenverkehr:

- Lärmsanierung an Bundesfernstraßen
- Aktualisierung des Lärmberechnungsverfahrens
- Bau von Ortsumgehungen (BMVBS 2009)

In Österreich, Frankreich und der Schweiz werden gleiche bzw. ähnliche Maßnahmen mit vergleichbaren Minderungspotenzialen ein- und umgesetzt. (BMLFUW 2007), (BAFU 2018)

2.4.3 Binnenschifffahrt

Da die Schallemissionen der Binnenschifffahrt meist unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen und die Schiffsmotoren vom Ufer aus kaum zu hören sind, ist eine Anwendung von Schallschutzmaßnahmen hier nicht notwendig. (BDB 2016), (WSV 2014)

Das nationale Verkehrslärmschutzpaket nennt folgende Maßnahmen in der Binnenschifffahrt:

- Überprüfung der Übergangsbestimmungen für ältere Binnenschiffe
- Nachrüstung von Liegestellen mit Stromtankstellen
- Schaffung beruhigter Zonen in der Binnen-/Sportschifffahrt
- Alternative Antriebe/Bordversorgung für Binnenschiffe
- Aktualisierung des Lärmberechnungsverfahrens („ABSAW“) (BMVBS 2009)

2.4.4 Vergleich der Verkehrsträger

Wie oben dargestellt, existieren in allen Verkehrsträgern verschiedenste Maßnahmen zur Schallreduktion. Um diesbezüglich einen kurzen Überblick zu geben und ggf. Maßnahmen, die auf den Schienenverkehr übertragen werden können, abzuleiten, sind in Tabelle 2-6 für ausgewählte Maßnahmen die Minderungspotenziale und in Tabelle 2-7 vergleichbare Maßnahmen bei verschiedenen Verkehrsträgern dargestellt.

Tabelle 2-6: Minderungspotenziale ausgewählter Maßnahmen bei verschiedenen Verkehrsträgern

Verkehrsträger	Maßnahme	Potenzial [dB(A)]	
Schienenverkehr	Besonders überwachtetes Gleis (BüG)	0,7 – 3,3	
	Schienenschmieranlage	ca. 5	
	Gabionenwände, 4 – 5 m hoch	ca. 10	
	Niedrige Schallschutzwand	3 – 6	
	Schienenstegdämpfer	3	
	Schallschutzwand Beton, 6 m hoch	10 – 15	
	Maßnahmen an Lokomotive	Optimierte Schaufelform	6 – 10
		Lärmoptimiertes Getriebe	5
		Schraubenkompressor	5 – 10
		Absorberjalousien am Kühleinlass und -auslass	5
	Maßnahmen am Güterwagen	Schallschürzen am Drehgestell	1 – 2
Schallschürzen am Radsatz		2	
Radschallabsorber		ca. 2,5	
Luftverkehr	Modifikation an Triebwerk und Zelle	2 – 3	
	- Lärmarme Vorflügel und Klappen - Aktive/passive Lärminderung - Lärmarmen An- und Abflug	5 – 6	
	- „design-to-noise“- Flugzeug Konfiguration - Getriebefan	10 – 12	
Straßenverkehr	Offenporiger Asphalt	3 – 7	
	Andere lärmarme Asphaltdeckschichten	2 – 5	
	Rautenelemente zwischen Fahrbahnübergängen	4 - 7	
	Geräuschreduzierende Reifen	ca. 3,5	
	Kapselung der Motorgeräusche	ca. 4 – 5 (Pkw) ca. 3 (Lkw)	

Es fällt auf, dass sich die dargestellten Minderungspotenziale in ähnlichen Größenordnungen bewegen. Demgegenüber existieren bei allen Verkehrsträgern Maßnahmen, die sehr große Spannen bei den jeweiligen Potenzialen aufweisen. Dies erschwert eine Aussage hinsichtlich der Reduktion der Schallemissionen einer bestimmten Maßnahme. Ebenfalls zu beachten ist, dass die genannten Potenziale für die einzelne Anwendung einer Maßnahme gelten. Die Auswirkung auf das Minderungspotenzial bei einer Kombination von mehreren Maßnahmen muss gesondert betrachtet werden.

Tabelle 2-7: Vergleichbare Maßnahmen bei verschiedenen Verkehrsträgern (eigene Darstellung)

Maßnahme/ Verkehrsträger	Schienenverkehr	Luftverkehr	Straßenverkehr
Maßnahmen am Fahrweg/ an der Fahrbahn	Besonders überwachtes Gleis + Schleifen von Rädern und Gleisen	Lärmreduzierung an der Quelle und lokale Maßnahmen	neue und optimierte Bauweisen des Fahrbahnoberaus + geräuschreduzierende Reifen
Maßnahmen am Fahrzeug/Flugzeug	Einhausungen für besonders laute Komponenten des Motors	Lärmreduzierung an der Quelle	Kapselung der Motorgeräusche
Betriebliche Maßnahmen	(Reduzierte Geschwindigkeit)	Lärmarme An- und Abflugverfahren	(Tempo-30-Zonen)
	Bisher nicht vorhanden	Lärmquoten	Bisher nicht vorhanden
	Bisher nicht vorhanden	Zeitliche Beschränkungen	Uhrzeitabhängige Geschwindigkeits- beschränkungen
	Bisher nicht vorhanden	Nachtflugverbot	(Sonntagsfahrverbot)
	(Umleitungs- strecken)	Noise Preferential Runways	(Ortsumgehungen)
	-	Rücken- bzw. Querwind-Starts	-
	Bisher nicht vorhanden	Nutzungsbeschränkungen der verfügbaren Start/Landebahnen	(Sonntagsfahrverbot)
	-	Flugbewegungs- kontingente	-

2.4.5 Fazit

Aus Tabelle 2-7 ist ersichtlich, dass vergleichbare Maßnahmen in verschiedenen Verkehrsträgern existieren. Im Luft- und Straßenverkehr ist eine Zuordnung von Maßnahmen eher möglich, als im Schienenverkehr. Dies liegt zum einen darin begründet, dass entweder entsprechende Maßnahmen im Schienenverkehr nicht existieren („Bisher nicht vorhanden“) und zum anderen, dass Maßnahmen generell nicht übertragbar sind („-“). Es lässt sich feststellen, dass im Schienenverkehr insbesondere betriebliche Maßnahmen weniger als bei den anderen Verkehrsträgern genutzt werden. Teilweise ist eine Zuordnung nur bedingt möglich, was durch Klammern um die entsprechenden Begriffe kenntlich gemacht wurde. Abschließend lässt sich feststellen, dass das Potenzial für Maßnahmen zur Schallreduktion im Schienenverkehr bisher nicht komplett ausgeschöpft wurde.

2.5 Betriebskonzept zur Reduktion von Schallemissionen

2.5.1 Einleitung

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die existierenden Maßnahmen der verschiedenen Verkehrsträger dargelegt wurden, wird nun der Begriff des „Betriebskonzeptes“ behandelt. Da in diesem planerische und betriebliche Maßnahmen zur Schallreduktion zur Anwendung kommen sollen, muss eine Definition vorliegen. Zunächst wird die Verwendung des Begriffs im Schienenverkehr erläutert. Es folgen die Verkehrsträger Luft- und Straßenverkehr sowie eine kurze internationale Recherche. Anschließend werden bestehende betriebliche Maßnahmen zur Schallreduktion beschrieben und das Kapitel mit einer Zusammenfassung abgeschlossen.

2.5.2 Begriff „Betriebskonzept“

Der Begriff „Betriebskonzept“ ist bei der Deutschen Bahn AG kein feststehender Begriff. Hier wird u. a. zwischen Betriebsverfahren, Betriebsprogramm, Fahrplankonzept und Fahrplan unterschieden.

Der Begriff Betriebsverfahren ist in den Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG 2017 (SNB 2017) festgehalten und beschreibt das „Verkehren von Zügen, Rangierfahrten u. a. [...] [und] ist im ISR als Thema „Betriebsverfahren“ hinterlegt“ (DB Netz AG 2017a).

Die Richtlinie 405 definiert das Betriebsprogramm als „datenmäßige Beschreibung aller Informationen zu betrieblichen Vorgängen und zu den Eigenschaften der an diesen Vorgängen beteiligten Beförderungseinheiten. Bei Fahrwegkapazitätsuntersuchungen dient es der Beschreibung der Leistungsanforderungen“ (DB Netz AG 2008). Im Abschnitt 0204 werden die wichtigsten Merkmale des Programms genannt. Diese sind:

- „Menge
- Struktur (Reihenfolge und Eigenschaften)
- Zeitliche Verteilung“ (DB Netz AG 2008)

Ein Fahrplankonzept „beinhaltet die im Zusammenhang mit einer oder mehreren Baubetriebsmaßnahmen erforderlichen Fahrplanregelungen. Eine Fahrplanregelung ist „die fahrplantechnische Planung von Zugtrassen unter EVU-bezogenen und netzinternen Prämissen mit dem Ziel der bestmöglichen Ausnutzung verbleibender Kapazitäten auf baubedingt eingeschränkter Infrastruktur“ (DB Netz AG 2017c).

Der Fahrplan eines Zuges ist „der geplante zeitliche Ablauf einer Zugfahrt auf ihrem Laufweg. Der Fahrplan eines Zuges umfasst mindestens

- die Zugcharakteristik (Angaben zum Buchfahrplankopf)
- den Laufweg mit den örtlich zulässigen Geschwindigkeiten,
- die Verkehrstageregelung,
- Fahrplanzeiten,
- Zugfolgeregeln“ (DB Netz AG 2009a).

Die DB Regio AG legt für die unterschiedlichen Phasen in einem Bauzeitraum verschiedene Betriebskonzepte fest. Darunter fallen z. B.:

- „Eingleisiger Betrieb
- Stark reduzierte Geschwindigkeit
- Baubedingte Linienänderung mit neuer Linienbezeichnung
- Vollsperrung einer Strecke“ (DB Regio AG 2016)

Demgegenüber möchte die S-Bahn Rhein-Ruhr mit einem Betriebskonzept einen „attraktiven Nahverkehr und eine Qualitätsverbesserung erreichen“ und nennt dazu folgende Eigenschaften ihres Konzeptes:

- „nachfrageorientierter 15/30-Minuten-Takt
- neue Direktverbindungen
- kürzere Reisezeiten
- neue Strecken [Angebot von Verbindungen]
- mehr Leistungen“ (VRR 2016)

In der Eisenbahn- Bau- und Betriebsordnung wird ebenfalls der Begriff Betriebsprogramm verwendet. Der Inhalt dieser Programme ist die Gestaltung von Bahnanlagen und Fahrzeugen mit dem Ziel, „eine möglichst weitreichende Barrierefreiheit für deren Nutzung zu erreichen“. Dadurch sollen u. a. behinderten Menschen, Kindern und Personen mit Nutzungsschwierigkeiten der Zugang zu Bahnanlagen und Fahrzeuge ohne besondere Erschwernisse ermöglicht werden. (Bundesrepublik Deutschland 2016b)

Im Luftverkehr existiert ein Betriebskonzept u. a. für die Randstunden. In diesem werden zu bestimmten Uhrzeiten einzelne Start- und Landebahnen nicht genutzt und so die Anwohner entlastet (Umwelthaus GmbH 2017). Die Betriebszeiten mit den planmäßigen Starts und Landungen ergeben den Flugplan (Fraport).

Im Straßenverkehr kommen Betriebskonzepte z. B. bei ÖPP-Projekten im Bundesfernstraßenbereich zur Anwendung. Es wird zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer unterschieden. Der Auftraggeber ist u. a. für die Erstellung eines Betriebs- und Erhaltungskonzeptes verantwortlich. (DEGES 2015)

In der Schweiz müssen Betriebskonzepte für jede Strecke und jeden Tunnel erstellt werden. Dabei beschreibt das Konzept, „wie die Strecke und die Tunnel im Normalfall und im Ereignisfall betrieben werden“. (ASTRA 2011)

Folgende Betriebsarten werden unterschieden:

- „Betrieb im Normalfall ‚Normalbetrieb‘
- Betrieb im Ereignisfall ‚Ereignisbetrieb‘
- Betrieb bei Anlagenstörung ‚Sonderbetrieb – Anlagenstörung‘
- Betrieb bei Unterhaltsarbeiten ‚Sonderbetrieb – Unterhalt‘“ (ASTRA 2011)

2.5.3 Bestehende betriebliche Maßnahmen zur Schallreduktion

Wie bereits beschrieben werden bisher kaum betriebliche Maßnahmen zur Schallreduktion eingesetzt. Das Schienenlärmschutzgesetz (SchlärmschG) wurde verabschiedet, welches faktisch den Einsatz lauter Güterwagen verbietet bzw. dieser nur dann zulässig ist, wenn dasselbe Schallniveau wie ein leiser Güterwagen erreicht wird. Dies ist nur über eine Geschwindigkeitsreduktion möglich. Ein nächtliches Fahrverbot befindet sich aktuell in der Diskussion (siehe Kapitel 1.1).

Durch eine Reduzierung der Geschwindigkeit auf z. B. 70 km/h würde sich ein geringerer Schallleistungspegel ergeben, da die Geschwindigkeit in dessen Berechnung eingeht (BMUB 2014). Demgegenüber würden sich höhere Transportkosten, eine Reduzierung des Transportaufkommens und eine Beförderungszeitverlängerung ergeben (VIA Consulting & Development GmbH und Railistics GmbH 2014). Somit muss eine Bewertung der Auswirkungen stattfinden, um den Einsatz der Maßnahme zu rechtfertigen.

Die Einführung eines Nachtfahrverbotes hätte auf der einen Seite eine massive Reduzierung des Schallpegels an einer Eisenbahnstrecke zur Folge, da deren Emissionen nicht weiter auftreten würden. Auf der anderen Seite würden sich gravierende Auswirkungen auf den Schienengüterverkehr ergeben. Da eine Verschiebung der Transporte in den Tag nicht möglich ist, müssten diese durch andere Verkehrsträger stattfinden. Die Verteuerung der Transporte und eine Verlängerung der Beförderungszeit wären die Folgen (VDV 2014). Auch hier muss vor dem Einsatz der Maßnahme eine Bewertung der Auswirkungen stattfinden.

2.6 Zusammenfassung

Aus obigen Ausführungen geht hervor, dass bei allen Verkehrsträgern bereits Maßnahmen für Fahrweg und Fahrzeug vorhanden sind und angewendet werden. Zum Teil kommen auch schon Betriebskonzepte zur Schallreduktion zur Anwendung. Eine einheitliche Definition des Begriffs „Betriebskonzept“ existiert über die verschiedenen Verkehrsträger hinweg nicht. Der Begriff wird vielmehr in unterschiedlicher Weise verwendet. Somit ist eine Übertragung auf den Schienenverkehr nur bedingt möglich.

Im Schienenverkehr existiert der Begriff des Betriebskonzeptes zwar, darunter wird aber nicht der Einsatz von schallmindernden Maßnahmen verstanden. Aus den genannten Gründen wird im Rahmen der Arbeit eine eigene Definition für den Begriff Betriebskonzept im Schienenverkehr entwickelt.

Die bestehenden betrieblichen Maßnahmen zur Schallreduktion werden momentan nicht eingesetzt, sondern befinden sich aktuell in der Diskussion. Daher kann bezüglich der genauen Schallreduktion und der entstehenden Folgen für den Betrieb nur bedingt eine Aussage getroffen werden. Ein Anwender erhält diesbezüglich keine Unterstützung.



3 Grundlagen

3.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen im Hinblick auf die in der Arbeit verwendeten Begriffsbezeichnungen dargelegt. Zunächst wird der Unterschied zwischen *Schall*, *Lärm* und einem *Geräusch* erläutert. Anschließend erfolgt eine Abgrenzung der Begriffsbezeichnungen *Emission*, *Transmission* und *Immission*. Die verschiedenen Akteure, die rechtlichen Grundlagen, die Betrachtung der Kapazität und Leistungsfähigkeit, Sperrzeit, Kosten im System Bahn und des Nutzens schließen das Kapitel ab.

3.2 Schall

3.2.1 Grundlagen und Formeln

Als Schall werden elastodynamische Schwingungen und Wellen bezeichnet. Die Voraussetzung für die Übertragung von Schall ist das Vorhandensein einer festen, flüssigen, gasförmigen oder plasmaförmigen Materie. Schall bildet zusammen mit dem Hörfrequenzbereich den Hörschall. Als Hörfrequenzbereich wird dabei der Frequenzbereich des ausgeprägten Hörvermögens beim Menschen bezeichnet. Der Frequenzbereich liegt zwischen 16 Hz und 16 kHz. (Maute 2006), (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009)

Als Lärm wird unerwünschter Hörschall bezeichnet, der zu Störungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009), (Kloepfer et al. 2006). Als Schaden wird eine „erhebliche Beeinträchtigung durch eine Schalllast, z. B. eine bleibende Beeinträchtigung, die ein bestimmtes Ausmaß überschreitet“ bezeichnet (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009). Lärm wird auch folgendermaßen definiert:

- „Lärm ist jede Art von Schall, der Menschen stört, belästigt, gesundheitlich schädigt, der ihre Leistungsfähigkeit herabsetzt, ihre Konzentrationsfähigkeit mindert, sie verunsichert.
- Lärm ist akustische Umweltverschmutzung.
- Lärm ist Mangel an Stille“ (Maute 2006).

Als Geräusch wird Schall bezeichnet, der nicht vorwiegend zur Übertragung von Informationen dient. Dazu zählt zum Beispiel das Fahrgeräusch eines Zuges. (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009)

Ob Schall als Lärm empfunden wird, hängt nicht nur von der Pegellautstärke, sondern ebenfalls vom Informationsgehalt und der Einstellung des Hörers ab. So kann zum Beispiel laute Musik als angenehm empfunden werden, wohingegen das Geräusch eines leise, tropfenden Wasserhahns als unangenehm empfunden werden kann. Lärm lässt sich aus physikalischer Sicht nicht messen, da die subjektive Einstellung des Hörers nicht mit Messverfahren erfasst werden kann (Krell 1990). Im Gegensatz dazu kann die Lautstärke eines Geräusches gemessen werden.

Ein Geräusch in Form von Schall wird durch Schwingungen hervorgerufen, die Über- und Unterdrücke (Druckschwankungen) erzeugen und sich in Materie (s. o.) in Form von Schallwellen ausbreiten. Je größer die Druckschwankungen ausfallen, desto größer ist die Schallintensität und umso lauter das

Geräusch (LfU 2017). Die Schallintensität kennzeichnet den Betrag des Schallintensitätsvektors. Dieser ist der zeitlich gemittelte Vektor der Energieflussdichte (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009). Je mehr Druckschwankungen pro Sekunde (= Frequenz, Einheit: Hz) stattfinden, desto höher wird der Ton wahrgenommen. Dem Schall kann nun ein Wechseldruck in Raum und Zeit zugeordnet werden, den sogenannten Schalldruck (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009). Aus dieser physikalischen Messgröße lässt sich der Schalldruckpegel (siehe Formel 3-1, Deutsches Institut für Normung e. V Juli 2014a) bilden:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad 3-1$$

Dabei sind:

- L_p Schalldruckpegel [dB]
- p Schalldruck [Pa]
- p_0 Bezugswert für Luftschall ($p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$)

Wird das Verhältnis eines über die Zeit T gemittelten Schalldruckquadrates p_A zum Quadrat des Bezugsschalldruckes p_0 gesetzt, ergibt sich der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel (siehe Formel 3-2, Deutsches Institut für Normung e. V Juli 2014a, Deutsches Institut für Normung e. V. Juli 2014b):

$$L_{pAeq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad 3-2$$

Dabei sind:

- $L_{pAeq,T}$ A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel [dB]
- T Messdauer [s]
- $p_A(t)$ A-bewertete momentane Schalldruck bei Laufzeit t [Pa]
- p_0 Bezugsschalldruck ($p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$)

Mit diesem lässt sich, unter Berücksichtigung von Zu- oder Abschlägen für bestimmte Geräusche, Zeiten oder Situationen, der Beurteilungspegel (siehe Formel 3-3 nach Müller und Möser (2004), Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009) berechnen. Werden keine Zu- oder Abschläge (siehe Kapitel 3.3) berücksichtigt, so entspricht der Beurteilungspegel dem äquivalenten Dauerschalldruckpegel:

$$L_r = 10 \lg \left[\frac{1}{T_r} \sum_{i=1}^n T_i \cdot 10^{0,1(L_{pAeq,T_i} + K_i)} \right] \quad 3-3$$

Dabei sind:

- L_r Beurteilungspegel [dB]
- T_r Beurteilungszeit [s]
- T_i Teilzeitintervall [s]
- L_{pAeq,T_i} A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel zum Zeitpunkt T_i [dB]
- K_i Zu- oder Abschläge [dB]

Im Rahmen der Arbeit erfolgt die Berechnung des Schallpegels nach Anlage 2 („Schall 03“) der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV). Der Schallpegel ist eine Beurteilungsgröße und wird mit der Einheit dB(A) angegeben. Nach Schall 03 wird der „Pegel der längenbezogenen Schalleistung $L_{WA,f,h,m,Fz}$ im Oktavband f , im Höhenbereich h , infolge einer Teil-Schallquelle m [...], für eine Fahrzeugeinheit der Fahrzeug-Kategorie Fz je Stunde“ nach Formel 3-4 berechnet (BMUB 2014).

$$L_{WA,f,h,m,Fz} = a_{A,h,m,Fz} + \Delta a_{f,h,m,Fz} + 10 \lg \frac{n_Q}{n_{Q,0}} \text{ dB} + b_{f,h,m} \lg \left(\frac{v_{Fz}}{v_0} \right) \text{ dB} + \sum_c (c1_{f,h,m,c} + c2_{f,h,m,c}) + \sum_k K_k \quad 3-4$$

Dabei sind:

- $L_{WA,f,h,m,Fz}$ Schalleistungspegel [dB]
- $a_{A,h,m,Fz}$ A-bewerteter Gesamtpegel der längenbezogenen Schalleistung bei der Bezugsgeschwindigkeit $v_0 = 100$ km/h auf Schwellengleis mit durchschnittlichem Fahrflächenzustand, nach Beiblatt 1 und 2 [dB]
- $\Delta a_{f,h,m,Fz}$ Pegeldifferenz im Oktavband f , nach Beiblatt 1 und 2 [dB]
- n_Q Anzahl der Schallquellen der Fahrzeugeinheit nach Nummer 4.1 bzw. 5.1 [-]
- $n_{Q,0}$ Bezugsanzahl der Schallquellen der Fahrzeugeinheit nach Nummer 4.1 bzw. 5.1 [-]
- $b_{f,h,m}$ Geschwindigkeitsfaktor nach Tabelle 6 bzw. 14 [-]
- v_{Fz} Geschwindigkeit nach Nummer 4.3 bzw. 5.3.2 [km/h]
- v_0 Bezugsgeschwindigkeit, $v_0 = 100$ km/h
- Term $\sum_c (...)$ Summe der c Pegelkorrekturen für Fahrbahnart ($c1$) nach Tabelle 7 bzw. 15 und Fahrfläche ($c2$) nach Tabelle 8 [dB]
- Term $\sum_k K_k$ Summe der k Pegelkorrekturen für Brücken nach Tabelle 9 bzw. 16 und die Auffälligkeit von Geräuschen nach Tabelle 11 [dB]

Mit der Schall 03 lässt sich nicht für alle Fahrzustände einer Zugfahrt (Beschleunigen, Beharren, Auslaufen, Bremsen) der Schallpegel berechnen. Die Berechnung der Schallpegel für die drei Zustände Beschleunigen, Auslaufen und Bremsen kann bisher nicht durchgeführt werden, da die Schall 03 vorsieht, den Schallpegel für einen bestimmten Zeitpunkt und somit für eine bestimmte Geschwindigkeit zu bestimmen. Diese ändert sich bei den genannten Zuständen ständig.

Dittrich (2007) beschreibt ein Modell zur Berechnung des Schallpegels, welches Ähnlichkeiten zur aktuellen Schall 03 aufweist. Auch hier werden die verschiedenen Schallquellen unterschiedlichen Höhen zugeordnet. Der Autor beschreibt weiterhin die Schallquellen, die bei bestimmten Fahrzuständen dominant sind. Zur Berechnung des Schalls beim Bremsen nennt er folgende Formel.

$$L_{peq,i,brake}(v) = 88 + 30 \lg \left(\frac{v}{80} \right) \quad 3-5$$

Dabei sind:

- $L_{peq,i,brake}(v)$ Schallpegel beim Bremsen [dB]
- v Geschwindigkeit [km/h]

Für eine genauere Berechnung des Schallpegels beim Bremsen sind zwei Messungen, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (Ausgangs- und Zielgeschwindigkeit), notwendig. Dittrich (2007) bildet den Einfluss des Bremsquietschens mit dem festen Wert von 100 dB ab.

Jansen et al. (2008) haben ebenfalls das Bremsgeräusch untersucht. Dabei wurden verschiedene Klotzbremsen auf zwei Arten untersucht: Bremsen bis zum Stillstand und Bremsen bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit. Auch hier wurde mit Messungen der zusätzliche Schallpegel beim Bremsen bestimmt. Diese variieren, je nach Klotzbremsenart, zwischen 3 und 9 dB(A).

Da aktuell nicht für alle Fahrzustände der Schallpegel mit der Schall 03 berechnet werden kann und aus den oben dargelegten Quellen lediglich Näherungswerte hervorgehen bzw. eine Spannweite gegeben wird und damit keine exakte Schallberechnung durchgeführt werden kann, wird folgende Vorgehensweise angewendet.

Beim Beschleunigen werden für die Ausgangsbeschleunigungskurve und die, aufgrund der Änderung durch eine Maßnahme, neue Beschleunigungskurve zwei Trendlinien ermittelt. Diese werden integriert, sodass zwischen dem Beginn und dem Ende der jeweiligen Beschleunigungsphase die Flächen unterhalb der Linien berechnet werden können. Durch Subtraktion der beiden Flächen ergibt sich die dB(A)-Reduktion für die gesamte Beschleunigungsphase.

Diese Vorgehensweise wird ebenfalls beim Auslaufen und beim Bremsen angewendet.

Dies soll die Berechnung des Schallpegels der drei genannten Zustände ermöglichen. Dadurch werden direkt die Ergebnisse der Schallberechnung beeinflusst. Dies ist bei der Aussage zum Nutzen einer Maßnahme und deren Bewertung zu beachten. Sollten in der Zukunft Formeln vorliegen, sind die hier getätigte Vorgehensweise und die ermittelten Werte entsprechend zu validieren und gegebenenfalls neu zu berechnen.

3.2.2 Bewertungen von Schallereignissen

Mit der A-Bewertung wird die Frequenz eines Geräusches bewertet. So werden die niedrigen und hohen Frequenzen von Geräuschen weniger stark berücksichtigt als die mittleren Frequenzen, da „das Ohr in den Randbereichen offensichtlich unempfindlicher ist“ (Kloepfer et al. 2006). Dies ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Die Hörschwelle ist definiert „als die Druckschwankung, die das Ohr unter Ruhebedingungen gerade noch erkennt. Sie ist stark von der Frequenz abhängig, was darauf hindeutet, dass sich das menschliche Empfinden der Lautstärke erheblich mit der Frequenz verändert“ (Kloepfer et al. 2006).

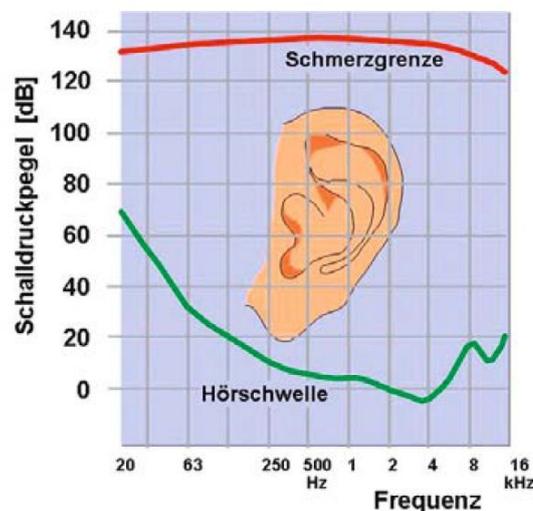


Abbildung 3-1: Hörbarer Amplitudenbereich (Kloepfer et al. 2006)

In Tabelle 3-1 sind einige Beispiele für typische Schallquellen und ihre zugehörigen Schalldruckpegel dargestellt.

Tabelle 3-1: Beispiele für typische Schallereignisse (BMVI 2016a)

Bereich	Schalldruckpegel [dB(A)]	Schallquelle
Schmerzschwelle	130	Düsenjäger in 7 m
	120	Verkehrsflugzeug in 7 m
Schädigungsbereich	110	Propellerflugzeug in 7 m
	100	Lautsprecher in Diskothek in 7 m
	90	Güterzug mit alter Bremstechnik (Grauguss-Sohle) in 7 m
Belästigungsbereich	80	Güterzug mit neuer Bremstechnik (z. B. Verbundstoff-Bremsklotzsohle) in 7 m, Personenzug in 7 m
	70	S-Bahn in 7 m
	60	Normales Gespräch in 1 m
Üblicher Tagespegel im Wohnbereich	50	Leise Radiomusik in 1m
	40	Kühlschrank in 1 m
	30	Flüstern in 1 m
Leiser Bereich	20	Leichter Wind
	10	Schneefall
Hörschwelle	0	-

Die Schallquellen im Schienenverkehr (siehe Abbildung 3-2) setzen sich aus den vier Komponenten Rollgeräusche, Antriebsgeräusche, Aggregatgeräusche und Aerodynamikgeräusche zusammen. Dabei wirken Roll- und Aggregatgeräusche bereits bei sehr geringen Geschwindigkeiten. Die Antriebs- und Aerodynamikgeräusche überschreiten bei 100 km/h einen Schallpegel von 50 dB(A), steigen dann aber relativ schnell an.

Kloepfer et al. (2006) berichtet, dass bis ca. 60 km/h die Aggregatgeräusche dominieren. Im mittleren Geschwindigkeitsbereich (60 – 280 km/h) weist das Rollgeräusch den größten Anteil am Schalleistungspegel auf. Bei einer Geschwindigkeit von mehr als 280 km/h ist das Aerodynamikgeräusch hauptsächlich für den Schall verantwortlich.

Neben den genannten Schallquellen können im Bahnbetrieb auch Rangier- und Verladegeräusche sowie Signalgeräusche auftreten (Deutsche Bahn AG 2009).

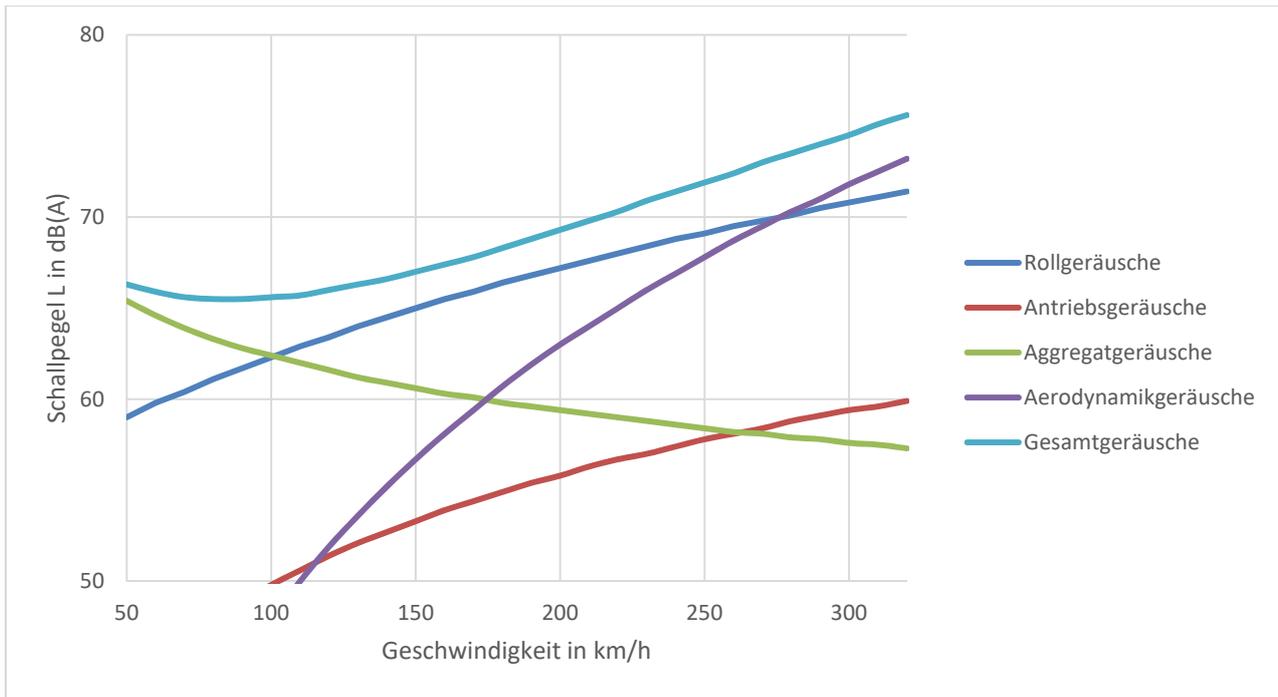


Abbildung 3-2: Längenbezogene Schallleistungspegel eines HGV-Triebzuges in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (nach BMVI 2015a)

3.2.3 Pegeländerung und Wahrnehmung

Wird die Anzahl gleichlauter Schallquellen verdoppelt, erhöht sich der Schallpegel um 3 dB(A) (Kloepfer et al. 2006). Erfolgt eine Halbierung der Anzahl der Schallquellen, reduziert sich der Schallpegel um 3 dB(A) (siehe Tabelle 3-2). Eine Verzehnfachung der Anzahl der Schallquellen führt zu einer Schallpegelerhöhung um 10 dB(A), welche der Mensch als Verdoppelung wahrnimmt (BMVI 2016a).

Tabelle 3-2: Pegeländerung und Wahrnehmung in Abhängigkeit der Schallquellenanzahl (BMVI 2016a)

Schallquellenanzahl	Pegeländerung [dB(A)]	Wahrnehmung der Veränderung
1	-	
2	+3	kaum
3	+5	
4	+6	spürbar
5	+7	
10	+10	Verdoppelung

Zur Veranschaulichung des soeben beschriebenen Sachverhaltes soll folgendes Beispiel dienen: Zur Erreichung einer spürbaren Reduktion des Pegels (≥ 3 dB(A)) können Minderungsszenarien aufgestellt werden. Wenn in einem Zeitraum von 10 Jahren eine gleichmäßig verteilte Reduktion je Fahrzeug von 3 dB(A) angestrebt wird, so wird eine Reduktion von 3 dB(A) für alle Fahrzeuge zwischen dem 5. und 6. Jahr erreicht (siehe Abbildung 3-3). Im letzten Jahr wird eine Reduktion von 3 dB(A) erreicht. Eine spürbare Reduktion setzt also erst nach der Hälfte des Zeitraums bzw. der Umrüstung der Hälfte der Fahrzeuge ein. (Kloepfer et al. 2006)

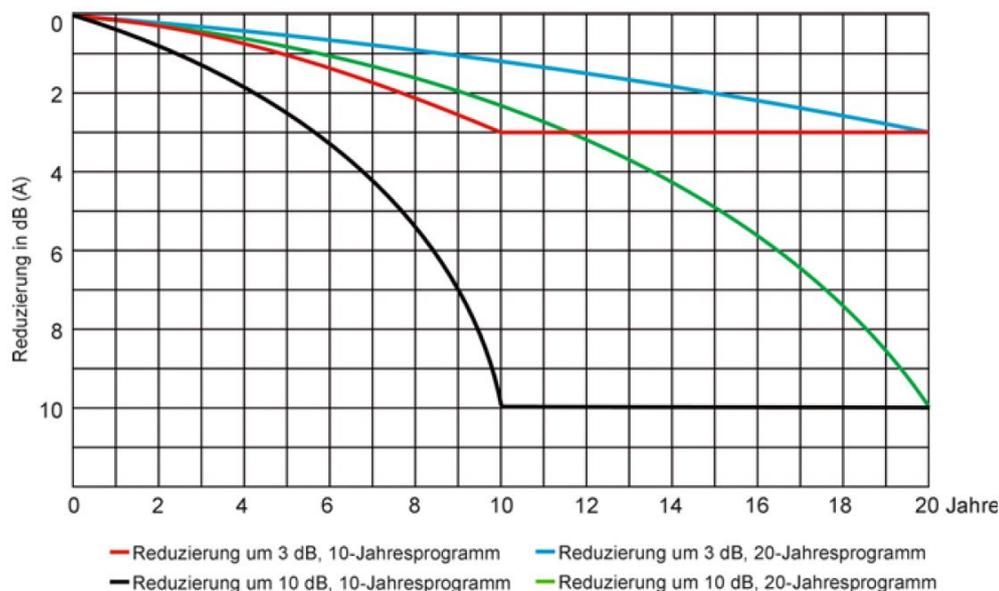


Abbildung 3-3: Vier verschiedene Minderungszenarien (Kloepfer et al. 2006)

Somit sollte nicht nur eine Maßnahmenart (aktiv, passiv oder Betriebskonzepte) zur Schallreduktion eingesetzt werden, sondern möglichst viele Maßnahmenarten zur gleichen Zeit, damit in einem frühen Stadium eine spürbare Reduktion erreicht wird.

Der Schall tritt am Emissionsort, im Transmissionsbereich und am Immissionsort auf. Die Begriffe werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Zur Schallmessung existieren verschiedene Verfahren. Diese werden im Rahmen der Arbeit nicht weiter beschrieben.

3.3 Emission

Als Emission oder Schallemission wird das Aussenden von Schall (siehe Kapitel 3.2) bezeichnet. Wenn von oder durch eine Quelle Schall abgestrahlt wird, wird dies als Emissionsschall oder Emissionspegel bezeichnet (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009), (BMVI 2016a). Im Rahmen der Arbeit wird dafür vereinfacht die Begriffsbezeichnung Emission verwendet. Die Emission kann mit Hilfe der Formeln der Schall 03 berechnet werden (BMUB 2014). Die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten zielen darauf ab, allein die Schallquellen am Emissionsort bzw. die Emissionen zu reduzieren. Eine Untersuchung von Maßnahmenarten zur Reduzierung der Immissionen findet nicht statt.

Wesentliche Einflussgrößen für die Emissionen sind die Verkehrsstärke, die Verkehrszusammensetzung, die Geschwindigkeit und der Gleiskörper (BMVI 2016a).

Der Beurteilungspegel am Emissionsort ist umso höher, je größer die Verkehrsstärke (Anzahl der Züge pro Stunde) bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen ist.

Ebenso erhöht sich der Beurteilungspegel, je größer der Anteil von Wagen mit Grauguss-Bremssohlen ist. Sie rauhen das Rad beim Bremsen auf und verstärken somit das Rollgeräusch und die Schienenrauheit (Asmussen et al. 2017).

Je höher die Geschwindigkeit ist, desto höher fällt auch der Beurteilungspegel aus.

Die Ausführung des Gleiskörpers (= Oberbau) beeinflusst ebenfalls die Emissionen. Hier wird unterschieden nach:

- Fester Fahrbahn
- Schotterbett mit Beton- oder Holzschwellen
- Bahnübergängen
- Brücken

Der jeweilige Einfluss wird durch Korrekturfaktoren in der Berechnungsvorschrift Schall 03 berücksichtigt.

3.4 Transmission

Zwischen dem Emissions- und dem Immissionsort liegt der Transmissionsbereich (Lenz 2016). In diesem breitet sich Schall unter bestimmten Bedingungen aus. Inwieweit die Höhe des Schallpegels zwischen Emissions- und Immissionsort abnimmt, hängt von folgenden Kriterien ab:

- Abstand zwischen Emissions- und Immissionsort
- Mittlere Höhe des Schallstrahles von der Quelle zum Immissionsort über dem Boden
- Pegeländerungen durch
 - Luftabsorption
 - Boden- und Meteorologiedämpfung
 - Topografische Gegebenheiten
 - Bauliche Maßnahmen (z. B. Schallschutzwände) (Müller und Möser 2004)

3.5 Immission

Als Immission oder Schallimmission wird die Einwirkung von Schall auf ein Gebiet oder einen Punkt bezeichnet (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009), (BMVI 2016a). Dabei ist die Immission das „Maß für die durchschnittliche Einwirkung von Schall an einem bestimmten Ort für ein bestimmtes Zeitintervall“ (Maute 2006). Wenn auf ein Gebiet oder einen Punkt Schall einwirkt, wird dies als Immissionsschall oder Immissionspegel bezeichnet (Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2009), (BMVI 2016a). Im Rahmen der Arbeit wird dafür die Begriffsbezeichnung Immission verwendet. Die Immission kann mit Hilfe der Formeln der Schall 03 berechnet werden (BMUB 2014). Welche Höhe die Immissionen aufweisen, hängt von der Höhe der Emissionen, dem Abstand zwischen Emissions- und Immissionsort und den Bedingungen im Transmissionsbereich (siehe Kapitel 3.4) ab (Maute 2006). Wie bereits in Kapitel 3.3 genannt, ist die Untersuchung von Maßnahmenarten zur Reduzierung der Immissionen nicht Bestandteil dieser Arbeit.

3.6 Akteure

3.6.1 Einleitung

Im Zusammenhang mit dem Umgang von Schallemissionen und –immissionen existiert eine Vielzahl von Akteuren, die im Hinblick auf eine Schallreduktion jeweils unterschiedliche Positionen vertreten und Ziele verfolgen. Um eine Abgrenzung zwischen den verschiedenen Akteuren und deren jeweiligen Positionen und Zielen zu erreichen, wird zum einen die Unterteilung nach BMVI herangezogen (BMVI 2016a). Zum anderen werden Unterkategorien eingeführt, die sich wie folgt unterscheiden lassen:

- Betroffene
- Bürgerinitiative
- Bundesbehörden und Europäische Union
- Deutsche Bahn AG
- Eisenbahninfrastrukturunternehmen
- Eisenbahnverkehrsunternehmen
- Kommunen
- Verbände
- Wagenhalter

Die verschiedenen Akteure werden im Folgenden jeweils kurz beschrieben.

3.6.2 Betroffene

Die Betroffenen werden direkt durch den Verkehr und die damit verbundenen Emissionen beeinflusst. Auf folgenden Korridoren/Strecken herrscht bereits heute ein hohes Verkehrsaufkommen und somit eine hohe Schallemission:

- Rheinstrecken Köln – Mannheim und Karlsruhe – Basel
- Hamburg/Bremen – Hannover – Würzburg
- Hamm – Hannover – Polen/Tschechien
- Gemünden – Regensburg – Passau
- München – Kufstein (UBA 2010a)

Als Betroffener gilt derjenige, bei dem der Beurteilungspegel einen, in der Schall 03 genannten, Immissionsgrenzwert (siehe Tabelle 3-3) überschreitet.

Tabelle 3-3: Immissionsgrenzwerte nach Schall 03 (BMUB 2014)

	Tag [dB(A)]	Nacht [dB(A)]
Krankenhäuser, Schulen, Kurheime und Altenheime	57	47
reine und allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete	59	49
Kerngebiete, Dorfgebiete und Mischgebiete	64	54
Gewerbegebiete	69	59

Dies stellt eine Vereinfachung im Rahmen dieser Arbeit dar, da natürlich auch eine Beeinflussung vorhanden ist, wenn die Immissionsgrenzwerte eingehalten werden. Zur Minderung der Beeinflussung können Maßnahmen am Fahrweg, Maßnahmen am Fahrzeug oder betriebliche Maßnahmen umgesetzt werden.

Um die Umsetzung der genannten Maßnahmen wirksamer vertreten zu können, bilden Betroffene eine Bürgerinitiative oder engagieren sich in einem Verband.

3.6.3 Bürgerinitiative

In einer Bürgerinitiative schließen sich mehrere Anwohner oder Betroffene zusammen, um ihre jeweilige Position (siehe Kapitel 3.6.2) deutlicher gegenüber den übrigen Akteuren zu vertreten. Darüber hinaus kann im Rahmen der Initiative und demzufolge mit einer größeren Personengruppe bedeutend mehr Druck beispielsweise auf die Bundesbehörden ausgeübt werden. Dieser Druck kann zu einer beschleunigten Umsetzung der o. g. Maßnahmen führen.

3.6.4 Bundesbehörden und Europäische Union

Innerhalb der Unterkategorie Bundesbehörden kann unterschieden werden nach:

- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
- EBA – Eisenbahn-Bundesamt
- UBA – Umweltbundesamt

Die Behörden und ihre Aufgaben werden im Folgenden kurz beschrieben.

BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Zusammen mit dem BMVI setzt sich das BMUB für den Lärmschutz im Schienenverkehr ein. „Es formuliert umweltpolitische Ziele des Verkehrslärmschutzes und bringt diese beispielsweise bei der Anpassung des Rechtsrahmens ein. Seitens des BMUB werden auch Forschungsvorhaben und Förderprogramme zum Verkehrslärmschutz mit umweltpolitischem Schwerpunkt finanziert“ (BMVI 2016a).

BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Zusammen mit dem BMUB setzt sich das BMVI für den Lärmschutz im Schienenverkehr ein. Dabei formuliert das BMVI „qualitative und quantitative Verkehrslärmschutzziele, zum Beispiel im Rahmen des Nationalen Verkehrslärmschutzpakets, und unterstützt die Lärmreduzierung mit unterschiedlichen Maßnahmen: Anpassung des Rechtsrahmens, Mittelbereitstellung und Initiieren von Forschungsvorhaben und Förderprogrammen zum Verkehrslärmschutz“ (BMVI 2016a).

EBA – Eisenbahn-Bundesamt

Das EBA ist eine selbstständige Behörde, die dem BMVI unterstellt ist. Sie ist die „Aufsichts-, Genehmigungs- und Sicherheitsbehörde an der Schnittstelle zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen, Fahrzeughaltern, Infrastrukturbetreibern und Bahnindustrie“ (EBA 2017a). Ihr zugeordnet ist die Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes (EUB), die Unfälle im Eisenbahnverkehr untersucht.

Zu den Aufgaben des EBA gehören (BMVI 2016a), (EBA 2017a):

- Planfeststellung für Betriebsanlagen der Eisenbahnen des Bundes
- Zulassung von Fahrzeugen und Schieneninfrastruktur
- Eisenbahnaufsicht
- Bewilligung von Fördermitteln

-
- Durchsetzung von europäischen Fahrgastrechten
 - Erteilung von Genehmigungen zur Lärmvorsorge und Maßnahmen zur Lärmsanierung
 - Lärmkartierung
 - Aufstellung eines bundesweiten Lärmaktionsplans

UBA – Umweltbundesamt

Die Aufgabe des UBA ist es, „sich umwelt- und gesundheitsrelevanten Problemlagen in der Gesellschaft anzunehmen und auf Lösungen hinzuwirken“ (UBA 2014). Des Weiteren „arbeitet und forscht [es] unter anderem zu Themen des Lärmschutzes und der Lärmwirkung. Es wirkt als Fachbehörde bei behördlichen Vorgängen zum Verkehrslärmschutz mit. Durch das UBA werden Forschungsvorhaben und Studien zum Lärmschutz finanziert und fachlich begleitet. Es ist auch zuständig für die Mitteilung der Ergebnisse der Umgebungslärmkartierung an die EU“ (BMVI 2016a). Das UBA veröffentlicht diverse Publikationen. Hier ist besonders die Studie zu den „Strategien zur effektiven Minderung des Schienengüterverkehrslärms“ zu nennen (UBA 2017a).

EU – Europäische Union

„Die EU ist zuständig für die europäischen (in den Mitgliedstaaten der EU geltenden) Rahmenbedingungen des Eisenbahnverkehrs, wie Technische Spezifikationen für die Interoperabilität transeuropäischer Bahnsysteme, und den europäischen Rechtsrahmen wie beispielsweise die EU-Umgebungslärmrichtlinie sowie für die europäischen Förderbedingungen“ (BMVI 2016a).

3.6.5 Deutsche Bahn AG

„Die Deutsche Bahn AG ist der größte Akteur im deutschen Bahnmarkt“ (BMVI 2016a). Sie ist u. a. der Mutterkonzern von:

- DB Cargo AG
- DB Energie GmbH
- DB Fernverkehr AG
- DB Netz AG
- DB Regio AG
- DB Station&Service AG
- DB Umweltzentrum

Somit vereint sie sowohl Eisenbahninfrastruktur- als auch Eisenbahnverkehrsunternehmen. Das DB Umweltzentrum nimmt dabei eine Sonderrolle ein, da es eine Schnittstelle zwischen Infrastruktur- und Verkehrsunternehmen bildet. Aus diesem Grund wird es hier kurz beschrieben.

DB Umweltzentrum

Das Umweltzentrum hat die Aufgabe, „Umweltziele insbesondere zum Lärmschutz zu erarbeiten und mit Programmen zu hinterlegen. Zudem unterstützen die Fachleute von DB Umwelt bei der Umsetzung von Lärmschutzprogrammen“ (BMVI 2016a).

3.6.6 Eisenbahninfrastrukturunternehmen

Ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) ist nach §2 des AEG „für den Bau, den Betrieb und die Unterhaltung der Schienenwege der Eisenbahn, einschließlich Verkehrsmanagement, Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung zuständig [...], mit Ausnahme der Schienenwege in Serviceeinrichtungen“ (Bundesrepublik Deutschland 2016a). Weiterhin setzt es Lärmschutzmaßnahmen an der Schieneninfrastruktur um. „Öffentliche EIU sind außerdem verpflichtet, an der Lärmaktionsplanung mitzuwirken“ (BMVI 2016a). Zur besseren Übersicht werden hier nur die Töchter-EIU des Deutsche Bahn Konzerns genannt:

- DB Energie GmbH
- DB Netz AG
- DB Station&Service AG

In Deutschland existieren insgesamt 181 Unternehmen, die Eisenbahnstrecken betreiben (EBA 2017c).

DB Energie GmbH

Die DB Energie GmbH ist als Energielieferant für die Versorgung mit Bahnstrom, Drehstrom, Gas und Dieselmotoren zuständig. Es werden nicht nur DB-Tochterunternehmen beliefert, sondern auch Dritte und Externe. (DB Energie GmbH 2017b)

DB Netz AG

Die DB Netz AG bezeichnet sich selbst als das „größte und leistungsfähigste Schieneninfrastrukturunternehmen Europas“ (DB Netz AG 2015a). Sie „unterhält die Schienenwege des Bundes. Sie nimmt im Bereich Portfolio Lärmsanierung die operative Gesamtprojektleitung (Bauherrenfunktion) für vordringlich zu bearbeitende Lärmsanierungsabschnitte wahr“ (BMVI 2016a). Dies umfasst u. a.:

- Betrieb und Instandhaltung von Eisenbahnstrecken
- Investitionen in die bestehende Infrastruktur
- Investitionen in Neu- und Ausbaustrecken
- Erstellung von Fahrplänen
 - Trassenanmeldung/-bestellung
 - Konflikterkennung
 - Konfliktlösung
- Vermarktung von Trassen, Anlagen und Dienstleistungen
- Diskriminierungsfreier Zugang zur Infrastruktur
- Sichere und zuverlässige Durchführung von Zugfahrten (DB Netz AG 2015a)

Gerade die Sicherstellung eines diskriminierungsfreien Zugangs zur Infrastruktur hat die DB Netz AG gemäß Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung (Bundesrepublik Deutschland 2005) und Eisenbahnregulierungsgesetz (Bundesrepublik Deutschland 2016c) sicherzustellen. Dabei müssen die gleichen Maßstäbe für alle Beteiligten (DB-Tochterunternehmen, Dritte und Externe) zu Grunde gelegt und deren Einhaltung überwacht werden. Die DB Netz AG wird diesbezüglich vom EBA (siehe Kapitel 3.6.4) und der Bundesnetzagentur kontrolliert (Bundesnetzagentur 2016).

DB Station&Service AG

Die DB Station&Service AG betreibt rund 5.400 Bahnhöfe und gehört damit zu den größten Bahnhöfbetreibern in Europa (DB Station&Service AG 2015). Die Kerngeschäfte sind neben „der Entwicklung und dem Betrieb von Bahnhöfen [...] auch die mobilitätsorientierten Dienstleistungen von hoher Qualität rund um den Bahnhof“ (DB Station&Service AG 2015).

3.6.7 Eisenbahnverkehrsunternehmen

Die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) sind nach §2 des AEG „alle Eisenbahnen, deren Tätigkeit im Erbringen von Eisenbahnverkehrsdiensten zur Beförderung von Gütern oder Personen besteht. Eisenbahnverkehrsunternehmen müssen die Traktion sicherstellen. Dies schließt auch Fahrzeughalter ein“ (Bundesrepublik Deutschland 2016a). Somit haben EVU maßgeblichen Einfluss auf den Einsatz bestimmter Wagen (BMVI 2016a). Dies betrifft Personen- als auch Güterwagen. Zur besseren Übersicht werden hier nur die Töchter-EVU des Deutsche Bahn Konzerns genannt:

- DB Cargo AG
- DB Fernverkehr AG
- DB Regio AG

In Deutschland existieren insgesamt 448 öffentliche und 148 nicht-öffentliche EVU (EBA 2017d), (EBA 2016). Zu den öffentlichen zählen z. B. die DB Fernverkehr AG, die DB Cargo AG und die VIAS GmbH. Zu den nicht-öffentlichen zählen z. B. die Audi AG und die Hamburg Port Authority (HPA) Hafenbahn.

DB Cargo AG

Die DB Cargo AG „ist das größte Schienengüterverkehrsunternehmen in Deutschland. Zudem ist sie Halter der größten nationalen Güterwagenflotte. Dadurch ist sie ein zentraler Akteur für den Einsatz leiser Güterwagen“ (BMVI 2016a). Zu den Aufgaben zählen (Deutsche Bahn AG 2015):

- Angebot von Gleisanschlüssen für Kunden
- Durchführung von Transportleistungen mit den Produkten
 - Ganzzug
 - Einzelwagenverkehr
 - Kombiniertes Verkehr
- Individuelle Branchenlösungen

DB Fernverkehr AG

Die DB Fernverkehr AG zählt zu den größten europäischen Verkehrsunternehmen im Schienenpersonenfernverkehr. Zu ihren Aufgaben zählen (DB Fernverkehr AG 2016):

- Durchführung von Transportleistungen
- Erfüllung der Kundenerwartungen
 - Angebot einer guten Beförderungsleistung
 - Erreichen bestimmter Qualitätskriterien

Dies umfasst die „Kundenzufriedenheit [...] und vor allem die Zuverlässigkeit der Verkehre und die Einhaltung der Servicestandards“ (DB Fernverkehr AG 2016).

DB Regio AG

Die DB Regio AG führt „alle Regionalverkehrsaktivitäten (Schiene und Bus) des DB-Konzerns in Deutschland sowie Verkehre von und aus Deutschland in benachbarte Länder“ durch (DB Regio AG 2017). Weiterhin schließt sie Verkehrsverträge ab und führt den Verkehr im Regionalbereich durch. Damit soll ein attraktives Verkehrsangebot gewährleistet werden (DB Regio AG 2017).

3.6.8 Kommunen

Die Kommunen „sind zuständig für die Bauleitplanung von Wohngebieten und in diesem Zusammenhang auch für die Lärmvorsorge. In Ballungsräumen sind sie außerdem für die Lärmaktionsplanung an Schienenwegen des Bundes verantwortlich, sofern das Recht der Länder hier nicht etwas anderes bestimmt“ (BMVI 2016a). Damit können sie, wie auch die Bürgerinitiativen (siehe Kapitel 3.6.3), bedeutenden Druck z. B. auf die Landes- oder Bundespolitik ausüben.

3.6.9 Verbände

In Verbänden können sich Anwohner/Betroffene (siehe Kapitel 3.6.2) oder Unternehmen zusammenschließen, um ihre Interessen und Absichten deutlicher gegenüber den übrigen Akteuren zu vertreten. Darüber hinaus kann im Rahmen eines Verbandes, also einer größeren Personengruppe, bedeutend mehr Druck auf die Bundesbehörden (siehe Kapitel 3.6.4) ausgeübt werden. Dieser Druck kann zu einer beschleunigten Umsetzung der o. g. Maßnahmen führen. In Bezug auf das Thema „Lärm“ lassen sich folgende Verbände nennen:

- Allianz pro Schiene
- Umwelt- und Fahrgastverbände
- VCD – Verkehrsclub Deutschland e. V.
- VDB – Verband der Bahnindustrie in Deutschland
- VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
- VPI – Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e. V.

Allianz pro Schiene

Das Hauptziel der Allianz pro Schiene ist „die Förderung des Umweltschutzes durch Steigerung des Marktanteils des Schienenverkehrs – sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr“ (Allianz pro Schiene e. V. 2017a). Aus dem Hauptziel werden folgende Verbandsziele abgeleitet:

- „die gestaltende Rolle der Politik Verkehrsträger übergreifend transparent machen und faire Wettbewerbsbedingungen einfordern
- die öffentlichen Mittel in zukunftsweisender Höhe für die Schiene einfordern und auf deren effektiven Einsatz drängen
- neue Trends weg von der Straßenfixierung aufspüren und hervorheben sowie parallel die Nutzerfreundlichkeit und Zugänglichkeit der Schiene stärken
- den Umweltvorteil der Schiene dokumentieren, kommunizieren und weiterentwickeln
- das Image des Verkehrsträgers verbessern“ (Allianz pro Schiene e. V. 2017a)

Dies spiegelt sich ebenfalls im Jahresbericht 2016 wieder, der u. a. folgende Punkte auflistet:

- „mehr Klimaschutz im Schienenverkehr
- Forderung, das [Bahn]Netz für 740 Meter lange Züge auszubauen
- Initiative gegen Schienenlärm: Die Bahnen werden leiser“ (Allianz pro Schiene e. V. 2017b)

Im Rahmen der Initiative gegen Schienenlärm wurden vom Verband sieben Schritte zu einem leiseren Schienengüterverkehr identifiziert:

- „Lärmschutzniveau verbessern
- Verbot lauter Güterwagen ab dem Fahrplanwechsel 2020/2021
- Fortschritte bei Lärmsanierung und –minderung nachvollziehbar dokumentieren
- Lärminderung Infrastruktur
- Lärminderung Fahrzeug
- Betriebliche Optimierung
- Innovation und Forschungsbedarf“ (Allianz pro Schiene e. V. 2016)

Die betriebliche Optimierung setzt dabei auf die Bildung von leisen Zügen während der Disposition und auf die Prüfung von betrieblichen Innovationen (z. B. Fahrerassistenzsysteme). In diesem Zusammenhang soll auch geprüft werden, ob mit diesen ebenfalls eine Schallreduktion erreicht werden kann. (Allianz pro Schiene e. V. 2016)

Umwelt- und Fahrgastverbände

Die Umwelt- und Fahrgastverbände „sind die Interessensvertretungen für Umweltbelange unter anderem eine Reduzierung des Bahnlärms und die Lobby für Fahrgäste des öffentlichen Verkehrs“ (BMVI 2016a).

VCD – Verkehrsclub Deutschland e. V.

Der VCD ist eine gemeinnützige Organisation der sich „mit ökologischer und zukunftsfähiger Mobilität beschäftigt. [Er setzt auf] ein sicheres und gerechtes Miteinander auf der Straße: für Fußgänger, Fahrradfahrerinnen, ÖPNV-Nutzer und Autofahrerinnen“ (VCD 2018). Die Ziele des VCD sind:

- „[...] weniger Autos auf unseren Straßen. Nicht immer kann man auf das Auto verzichten, daher setzen wir uns für möglichst effiziente und leise Autos ein, die im besten Fall von vielen Menschen genutzt werden. So wenig Auto wie möglich, so viel wie nötig.
- Verkehr soll möglichst wenig Ressourcen und Flächen verbrauchen und möglichst wenig krankmachenden Lärm und schlechte Luft verursachen.
- Wir wollen, dass alle Verkehrsteilnehmer/-innen sicher und gesund unterwegs sein können - insbesondere Kinder, ältere und mobilitätseingeschränkte Menschen.
- Wir machen uns für eine fußgänger- und fahrradfreundliche Verkehrspolitik und -planung stark.

-
- Wir kämpfen für umwelt- und menschenverträgliche Geschwindigkeiten - Tempo 30 innerorts, Tempolimit auf Autobahnen.
 - [...] ein gut ausgebauter, kundenfreundlicher und solide finanzierter öffentlicher Verkehr.“ (VCD)

VDB – Verband der Bahnindustrie in Deutschland

Der VDB „ist die Interessenvertretung der Bahntechnikhersteller in Deutschland. Die Unternehmen haben eine zentrale Stellung bei der Entwicklung und Herstellung innovativer Lärminderungsstechnik“ (BMVI 2016a). Weiterhin sorgt der Verband für „die Förderung fairer Geschäftsbedingungen zwischen Systemhäusern und Zulieferern. [...] Dazu gehört auch die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Bahnindustrie durch technische Zusammenarbeit im vorwettbewerblichen Bereich und die Optimierung von Geschäftsprozessen“ (VDB 2010).

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

Der VDV „ist die Interessensvertretung für die deutschen Verkehrsunternehmen und damit auch für die Unternehmen des Schienengüterverkehrs“ (BMVI 2016a). Er zählt etwa 600 Mitglieder aus den verschiedensten Sektoren (VDV 2016). Er fördert „die Weiterentwicklung des öffentlichen Personenverkehrs und des Schienengüterverkehrs mit dem Ziel einer verbesserten Kundenorientierung, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit“ (VDV 2016). Des Weiteren veröffentlicht der VDV Schriften, Mitteilungen und Positionen und gibt Studien in Auftrag. Hier ist besonders die Studie der „Folgen von Geschwindigkeitsbeschränkungen für den Schienengüterverkehr aus Lärmschutzgründen“ (VIA Consulting & Development GmbH und Railistics GmbH 2014) zu nennen.

VPI – Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e. V.

Der Verband nimmt mit Hilfe zweier Stoßrichtungen Einfluss auf die Bundesbehörden. Zum einen werden eigene Lösungen für aktuelle Probleme präsentiert. Zum anderen wird eine klare Position mit entsprechenden Zielen vertreten. Im Jahr 2015 waren 197 Mitglieder im Verband vertreten (VPI 2016). Als Hauptziel wird die Schaffung „bestmöglicher Rahmenbedingungen für den Schienengüterverkehr“ (VPI 2016) genannt. Zusammen mit dem VDV und dem BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.) wurde die Studie der „Folgen von Geschwindigkeitsbeschränkungen für den Schienengüterverkehr aus Lärmschutzgründen“ (VIA Consulting & Development GmbH und Railistics GmbH 2014) in Auftrag gegeben.

3.6.10 Wagenhalter

Die Wagenhalter besitzen die Wagen und haben somit „die Verantwortung für die Umrüstung beziehungsweise den Kauf leiser Güterwagen“ (BMVI 2016a). Sie haben Anspruch auf den Umrüstbonus des Bundes. In Deutschland werden die meisten Wagen von EVU oder Wagenvermietergesellschaften betrieben. Deren Interessen werden im Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e. V. (VPI) und dem Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) vertreten. (BMVI 2016a).

3.7 Rechtliche Grundlagen

Da die im Rahmen der Arbeit entwickelten Maßnahmenarten zur Anwendung kommen sollen, müssen diese die gesetzlichen Regelungen und die rechtlichen Grundlagen zum Umgang mit Schall erfüllen. Zum besseren Verständnis werden diese im Folgenden kurz erläutert. Hierbei ist zwischen der europäischen und der nationalen Ebene zu unterscheiden.

3.7.1 Europäische Ebene

Auf europäischer Ebene bestehen folgende rechtliche Grundlagen:

- EU-Umgebungslärmrichtlinie (2002/49/EG)
- Verordnung über die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnverkehrs (Deutsche Bahn AG 2017b)

EU-Umgebungslärmrichtlinie (2002/49/EG)

Mit dieser Richtlinie soll „ein gemeinsames Konzept festgelegt werden, um vorzugsweise schädliche Auswirkungen, einschließlich Belästigung, durch Umgebungslärm zu verhindern, ihnen vorzubeugen oder sie zu mindern. Hierzu werden folgenden Schritte durchgeführt:

- a) Ermittlung der Belastung durch Umgebungslärm anhand von Lärmkarten nach für die Mitgliedstaaten gemeinsamen Bewertungsmethoden;
- b) Sicherstellung der Information der Öffentlichkeit über Umgebungslärm und seine Auswirkungen;
- c) auf der Grundlage der Ergebnisse von Lärmkarten Annahme von Aktionsplänen durch die Mitgliedstaaten mit dem Ziel, den Umgebungslärm soweit erforderlich und insbesondere in Fällen, in denen das Ausmaß der Belastung gesundheitsschädliche Auswirkungen haben kann, zu verhindern und zu mindern und die Umweltqualität in den Fällen zu erhalten, in denen sie zufrieden stellend ist“ (Europäische Union 2002).

In Deutschland wurde aufgrund der o. g. Richtlinie das Bundes-Immissionsschutzgesetz (s. u.) entsprechend geändert. „Im Fokus der Richtlinie steht, Lärmkarten zu erstellen und Lärmaktionspläne zu entwickeln sowie die Bürger an diesen Prozessen zu beteiligen“ (Deutsche Bahn AG 2017b). Die Mitgliedsstaaten müssen u. a. für Ballungsräume mit mehr als 250.000 Einwohnern und für Haupteisenbahnstrecken mit mehr als 60.000 Zügen pro Jahr Lärmkarten erstellen (Europäische Union 2002). In Deutschland wurden diese durch das EBA veröffentlicht (EBA 2017b). Auf Grundlage dieser Lärmkarten „müssen die Gemeinden für lärmbelastete Gebiete so genannte Lärmaktionspläne entwickeln und Vorschläge erarbeiten, wie Lärmprobleme vermieden beziehungsweise gemindert werden können“ (Deutsche Bahn AG 2017b). Für die Lärmaktionspläne an Haupteisenbahnstrecken ist das EBA verantwortlich (EBA 2017b).

„Zur einheitlichen Berechnung der Lärmkarten wurden den EU-Ländern die Lärmindizes LDEN und LNight vorgegeben. LDEN ist das Maß für die allgemeine Belästigung, der LNight das Maß für die Störungen des Schlafes. In Deutschland werden die beiden Lärmindizes nach dem Verfahren der „Vorläufigen Berechnungsvorschrift für den Umgebungslärm an Schienenwegen“ (VBUSch) berechnet.

Die Ergebnisse nach VBUSch fließen in die Lärmkartierung ein und bilden die Grundlage für die Lärmaktionsplanung“ (Deutsche Bahn AG 2017b).

Verordnung über die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnverkehrs

Die Verordnung „regelt die Bedingungen für die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union [...]“ (Europäische Union 2007). Sie soll dabei sicherstellen, dass „ein Zug die unterschiedlichen Eisenbahnstrecken der EU-Länder ohne technische Einschränkungen befahren kann“ (Deutsche Bahn AG 2017b). In diesen „technischen Spezifikationen für die Interoperabilität“ (TSI) sind „die gemeinschaftlichen Vorgaben für Infrastruktur, technische Anlagen, Versorgungssysteme und Fahrzeuge enthalten“ (Deutsche Bahn AG 2017b). So legt die „TSI Lärm“ für verschiedene Fahrzeugkategorien Grenzwerte für das Stand-, Anfahr-, Vorbeifahr- und Innengeräusch im Führerstand fest (Europäische Union 2014).

3.7.2 Nationale Ebene

Auf nationaler Ebene bestehen folgende rechtliche Grundlagen:

- Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG
- Schienenlärmschutzgesetz – SchlärmschG
- Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV
- Verordnung über die Lärmkartierung – 34. BImSchV (Deutsche Bahn AG 2017b)

Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG

Der Zweck des Gesetzes ist es, „Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen“ (Bundesrepublik Deutschland 2016d). Es enthält u. a. einen Teil zur Lärminderungsplanung (§47a ff.) (Bundesrepublik Deutschland 2016d), welcher die EU-Umgebungslärmrichtlinie in deutsches Recht überführt (Deutsche Bahn AG 2017b). Das BImSchG ist in zahlreiche Rechtsverordnungen (z. B. Verkehrslärmschutzverordnung) und zwei Verwaltungsvorschriften (TA Luft und TA Lärm) untergliedert (UBA 2017b).

Schienenlärmschutzgesetz – SchlärmschG

Das Gesetz zum Verbot des Betriebs lauter Güterwagen (Schienenlärmschutzgesetz) trat am 20.07.2017 in Kraft (Bundesrepublik Deutschland 2017b), (Deutscher Bundestag 2017a). Mit dem Gesetz soll „im Wesentlichen ein Verbot des Betriebs lauter Güterwagen mit Grauguss-Bremssohlen zu Beginn des Netzfahrplans 2020/2021 bewirkt werden [...]“ (Bundesrepublik Deutschland 2017b). Ein Güterwagen wird dann als „laut“ bezeichnet, wenn er die Grenzwerte der TSI Lärm (s. o.) nicht einhält. Sollte dies der Fall sein, müssen Maßnahmen ergriffen werden (z. B. Umrüstung von Wagen oder Geschwindigkeitsverringerung), die zu einem geringeren Schallpegel führen. So soll sichergestellt werden, dass der „entstehende Schall auf das Maß [...] von leisen Güterwagen mit Verbundstoff-Bremssohlen oder Scheibenbremsen“ begrenzt wird (Deutscher Bundestag 2017b).

Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV

Die Verordnung gilt „für den Bau oder die wesentliche Änderung von öffentlichen Straßen sowie von Schienenwegen der Eisenbahnen und Straßenbahnen (Straßen und Schienenwege)“ (BMUB 2014).

Eine Änderung ist wesentlich, „wenn

1. eine Straße um einen oder mehrere durchgehende Fahrstreifen für den Kraftfahrzeugverkehr oder ein Schienenweg um ein oder mehrere durchgehende Gleise baulich erweitert wird oder
2. durch einen erheblichen baulichen Eingriff der Beurteilungspegel des von dem zu ändernden Verkehrsweg ausgehenden Verkehrslärms um mindestens 3 Dezibel (A) oder auf mindestens 70 Dezibel (A) am Tage oder mindestens 60 Dezibel (A) in der Nacht erhöht wird.

Eine Änderung ist auch wesentlich, wenn der Beurteilungspegel des von dem zu ändernden Verkehrsweg ausgehenden Verkehrslärms von mindestens 70 Dezibel (A) am Tage oder 60 Dezibel (A) in der Nacht durch einen erheblichen baulichen Eingriff erhöht wird; dies gilt nicht in Gewerbegebieten“ (BMUB 2014).

Die Verordnung nennt weiterhin Immissionsgrenzwerte, die nach dem Bau oder einer wesentlichen Veränderung einzuhalten sind. Des Weiteren wird die Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege festgelegt und in Anlage 2 das Berechnungsverfahren (Schall 03) dargelegt. (BMUB 2014)

Mit der Schall 03 lässt sich nicht für alle Fahrzustände einer Zugfahrt (Beschleunigen, Beharren, Auslaufen, Bremsen) der Schallpegel berechnen. Die Berechnung der Schallpegel für die drei Zustände Beschleunigen, Auslaufen und Bremsen kann bisher nicht durchgeführt werden, da die Schall 03 vorsieht, den Schallpegel für einen bestimmten Zeitpunkt und somit für eine bestimmte Geschwindigkeit zu bestimmen. Diese ändert sich bei den genannten Zuständen ständig. Da, wie bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben, zum einen, diesbezüglich bisher kaum Erfahrungswerte vorliegen und zum anderen, die Festlegung eines Zahlenwertes sehr ungenau sein kann, wird die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Vorgehensweise angewendet.

Verordnung über die Lärmkartierung – 34. BImSchV

Die Verordnung gilt „für die Kartierung von Umgebungslärm. Sie konkretisiert Anforderungen an Lärmkarten nach §47c des Bundes-Immissionsschutzgesetzes“ (BMUB 2006). So werden u. a. Lärmindizes für die drei Zeiträume 06:00 – 18:00 Uhr (Tag), 18:00 – 22:00 Uhr (Abend) und 22:00 – 06:00 Uhr (Nacht) eingeführt. Damit kann im Rahmen der „Vorläufigen Berechnungsvorschrift für den Umgebungslärm an Schienenwegen“ (VBUSch) eine Berechnung des Umgebungslärms erfolgen (Deutsche Bahn AG 2017b). „Dieses Verfahren erfüllt die Forderungen der EU-Umgebungslärmrichtlinie, nach der nationale Vorschriften so anzupassen sind, dass sie europaweit einheitlich sind“ (Deutsche Bahn AG 2017b). Dies bedeutet, dass die Schall 03 in diesem Fall nicht angewendet werden darf und stattdessen nach VBUSch gerechnet werden muss. „Derzeit werden die Ergebnisse aus dem Verfahren nach Schall 03 immer dann angewendet, wenn der Umfang des Schallschutzes bei der Lärmvorsorge oder der Lärmsanierung zu ermitteln ist (Deutsche Bahn AG 2017b).

3.8 Kapazität und Leistungsfähigkeit

Die Erläuterungen zu den Begriffsbezeichnungen *Kapazität* und *Leistungsfähigkeit* sind für die detaillierte Beschreibung der Maßnahmenarten erforderlich. Diese bildet die Grundlage für eine detaillierte Bewertung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten. Es wird für jede Maßnahme die Veränderung der Fahrzeit ermittelt. Dies führt zu einer Änderung der Anzahl der Zugbewegungen und zu einer Änderung der Nennleistung.

Die Kapazität oder auch die Fahrwegkapazität stehen für Leistungskenngrößen von Netzelementen. Für die Fahrwegkapazität wird auch der Begriff Schienenwegkapazität verwendet. (DB Netz AG 2008)

Die Leistungsfähigkeit ist der „Oberbegriff für verschiedene Kenngrößen der Fahrwegkapazität“ (DB Netz AG 2008). So bezeichnet die Leistung die Anzahl von Zug- oder Rangierbewegungen, die in einem Netzelement (z. B. Streckenabschnitt, Knoten) in einem Untersuchungszeitraum (z. B. eine Stunde) verarbeitet werden können bzw. zu verarbeitend sind. Die Leistungsfähigkeit bezeichnet in diesem Zusammenhang „die entsprechende durchführbare Anzahl von Zugfahrten.“ (DB Netz AG 2008)

Bei der Leistungsfähigkeit wird zwischen der praktischen und der theoretischen Leistungsfähigkeit unterschieden. Die praktische Leistungsfähigkeit gibt den Wert einer fahrbaren Zugzahl an, die unter Einhaltung bestimmter Qualitätsgrenzen möglich ist. Die theoretische Leistungsfähigkeit gibt den maximalen Wert einer verarbeitbaren Zugzahl an, ohne dabei die Qualität und deren Grenzen zu beachten. (DB Netz AG 2008)

Die praktische Leistungsfähigkeit wird unterteilt in:

- Fahrplanleistungsfähigkeit
- Infrastrukturbezogene Leistungsfähigkeit
- Nennleistung
- Spezifizierte Leistungsfähigkeit (DB Netz AG 2008)

3.9 Sperrzeit eines Blockabschnitts und Nennleistung

Die Sperrzeit setzt sich aus geschwindigkeitsabhängigen und festen Zeitanteilen (siehe Abbildung 3-4) zusammen. Durch den Einsatz einer Maßnahme werden die geschwindigkeitsabhängigen Zeitanteile beeinflusst. Dies sind die Annäherungsfahrzeit, die Fahrzeit im Blockabschnitt und die Räumfahrzeit. Die festen Zeitanteile werden nicht beeinflusst und daher nicht weiter betrachtet.

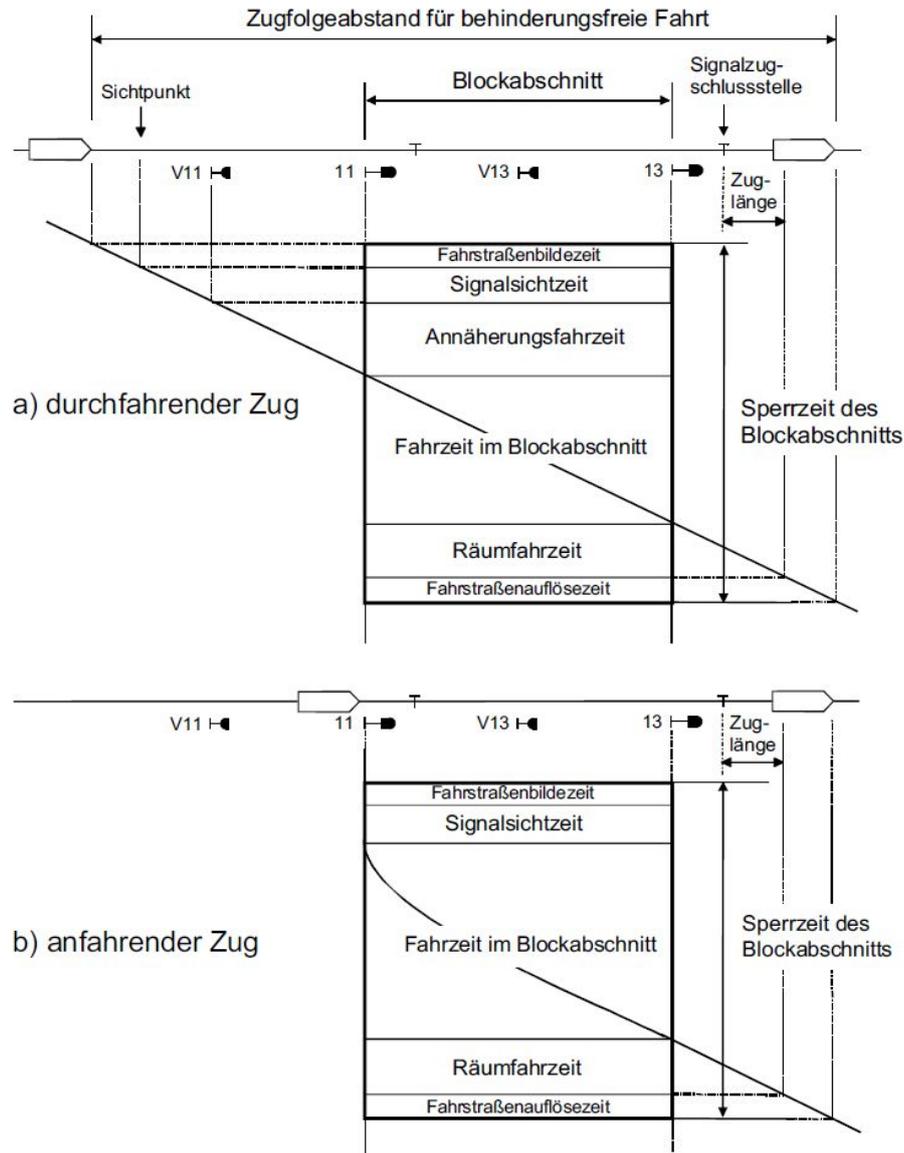


Abbildung 3-4: Sperrzeit eines Blockabschnitts (Pachl 2016)

Wie in Kapitel 3.8 beschrieben, werden in der DB-Richtlinie 405 verschiedene Leistungsfähigkeiten unterschieden. Im Weiteren beziehen sich die Angaben zur Leistungsfähigkeit auf die Nennleistung. Die Nennleistung (siehe Abbildung 3-5) entspricht „der Anzahl von Zugtrassen bzw. Zuglagen je Untersuchungszeitraum, die innerhalb eines Netzelementes

- auf der verfügbaren bzw. zu Grunde gelegten, wirtschaftlich ausgelasteten betrieblichen Infrastruktur
- bei vorgegebener Struktur des Betriebsprogramms (Zugfolge, Zugeigenschaften, Reihenfolgeregelung)
- einschließlich der bei der Fahrplanbearbeitung zu berücksichtigenden Reservezeitanteile (Regel- und Bauzuschlägen, Pufferzeiten u.a.)
- während des Betriebsablaufes voraussichtlich mit einer definierten im wirtschaftlich optimalen Bereich liegenden Qualität [...]

verarbeitbar sind (optimale Zugzahl Betrieb)“ (DB Netz AG 2008).

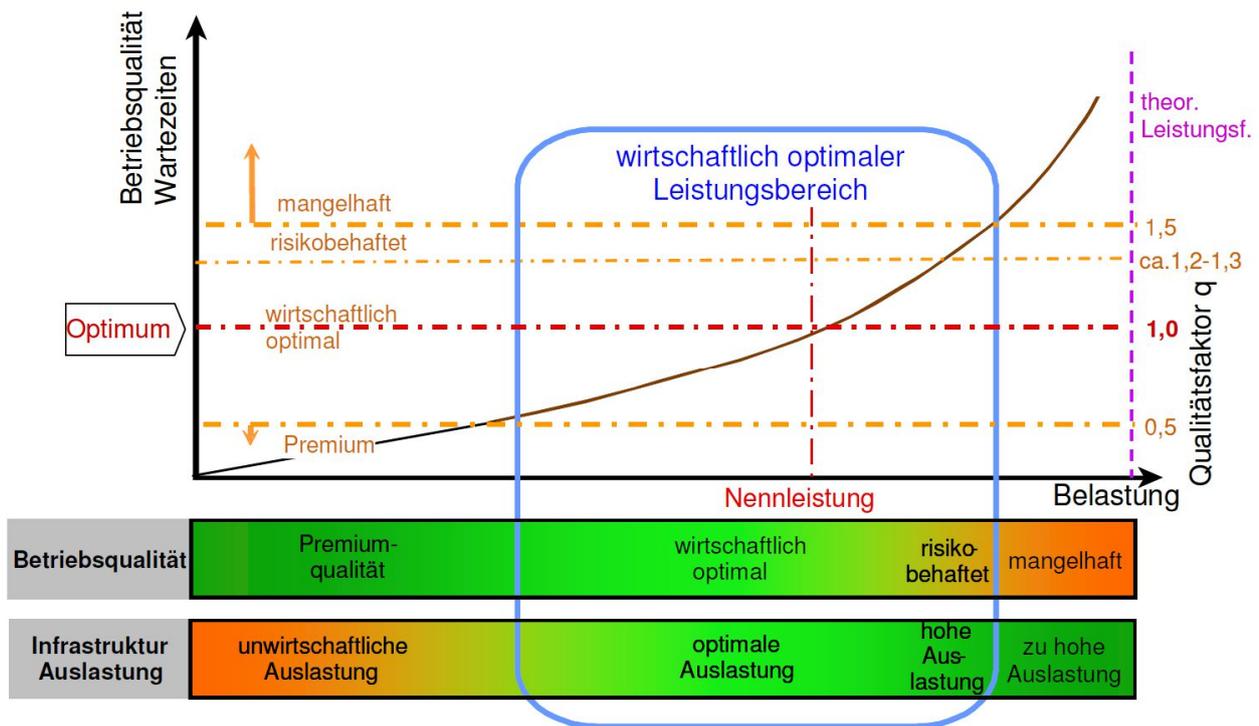


Abbildung 3-5: Zusammenhang zwischen Betriebsqualität und Belastung (DB Netz AG 2008)

3.10 Kosten im System Bahn

Zur Abgrenzung der Kosten im System Bahn werden zunächst deren Bestandteile und Besonderheiten genannt. Das System Bahn besteht aus

- „der Infrastruktur (Fahrweg, Bahnhöfe und Betriebsgelände),
- der Suprastruktur (Signale und Gleisschaltmittel, Stellwerke und Leitzentralen, Energieversorgung und Oberleitung),
- den Fahrzeugen (Triebfahrzeuge einschließlich Triebwagen und Wagen) und
- der verkehrlichen und betrieblichen Organisation inkl. des Personals“ (Lübke 2008).

Die Definition umfasst sowohl Bestandteile von Eisenbahninfrastruktur- als auch Eisenbahnverkehrsunternehmen. Das hat zur Folge, dass Kosten eines EVU (z. B. Trassenpreise) gleichzeitig Erlöse eines EIU (z. B. Trassengebühren) sind und sich diese im systembezogenen Ansatz neutralisieren. Die Berechnung der Kosten erfolgt getrennt für EIU und EVU. Die Kosten und Erlöse werden ausschließlich aus einer betriebswirtschaftlichen Sicht bei Anwendung einer Maßnahme beschrieben.

Durch die Anwendung einer Maßnahme entstehen im System Bahn meist zusätzliche Kosten, die ohne die Anwendung nicht auftreten würden. Diese Kosten werden in der Literatur als Betriebserschwerungskosten (BEK) bezeichnet. Es existieren verschiedene Definitionen der BEK.

Hempe (2006) definiert BEK als „die Mehrkosten eines gestörten Betriebsablaufes gegenüber dem Regelbetrieb und die durch entgangene Einnahmen, Pönalen und Imageverluste verursachten kommerziellen Verluste“.

Frizen (2012) hingegen bezeichnet die Betriebserschwernisse als die „Behinderungen des Regelbetriebs, die von Seiten der Infrastruktur aufgrund von Baumaßnahmen verursacht werden.“

Konsequenz von Betriebserschwernissen sind zum einen die aus den Behinderungen resultierenden Verspätungen der geplanten Verkehre und zum anderen Kapazitätseinschränkungen, aus denen sich wiederum Folgeprobleme ergeben. Betriebserschwernisse lassen sich am besten durch die entstehenden Kosten messen. Als Betriebserschwerneiskosten werden daher alle Zusatzkosten verstanden, die Folge betrieblicher Behinderungen bzw. der Reaktion auf betriebliche Störungen sind“.

Eine ähnliche Definition gibt Heister (2005). Danach müssen neben den direkten Kosten einer Baumaßnahme (Planungs-, Bau- und Logistikkosten) auch die zusätzlichen Kosten für die Betriebsführung (Betriebserschwerneiskosten) beachtet werden. Des Weiteren „müssen die Pünktlichkeits- und Qualitätseinbußen in ein Verhältnis zu der zu erwartenden verringerten Nachfrage (Erlösminderungen) gesetzt werden. Auch hier können bereits aus vertraglichen Verpflichtungen heraus Zahlungen (Pönale) an die Kunden der DB Netz AG fällig werden [...]“ (Heister 2005).

Nebelung (1957) unterteilt Betriebserschwerneisse in pauschale Kosten (je Zugfahrt, Brems- und Beschleunigungsphase, Ausfall eines Halts) und in Kosten je Zeiteinheit in Abhängigkeit der Zugeigenschaften (z.B. Zugart, Baureihe und Zuglast). Diese umfassen das Stutzen, außerplanmäßiges Halten, Abbildung von Verspätungen, Aufholen von Verspätungen sowie vorübergehende Langsamfahrstellen.

Brettmann (1965) führt ein „Betriebsmehrkostenheft“ mit Diagrammen für die Verbrauchswerte von Triebfahrzeugen in Abhängigkeit von Last und Geschwindigkeit ein. Weitere Diagramme geben die veränderten Verbrauchswerte für Beschleunigen und Bremsen bei einer Langsamfahrstelle im Vergleich zum Durchfahren an.

In Deutsche Bundesbahn (1970) werden zwischen unmittelbaren und mittelbaren Kosten differenziert. Diese entstehen durch:

- „Ermäßigen der Geschwindigkeit von Zügen (Langsamfahrstellen)
- Anhalten von Zügen
- Umleiten von Zügen
- Aufstellen von Bau- und Betriebsanweisungen und Sperranordnungen“

Weiterhin wird zwischen der Höhe der Verspätung unterschieden. Bei weniger als 10 Minuten entstehen lediglich Kosten für die Fahrzeuginstandhaltung und Sachkosten, da davon ausgegangen wird, dass die Verspätung wieder aufgeholt werden kann. Bei einer Verspätung von mehr als 10 Minuten entstehen zusätzliche Kosten für die Vorhaltung von Fahrzeugen und Personal.

Nach Schilling (2000) umfassen die BEK:

- „Zugfördermehraufwand infolge Brems- und Beschleunigungsvorgängen
- Kurz- oder langfristige Verkehrsverluste aufgrund des eingeschränkten Angebots
- Betrieblicher Organisationsaufwand
- Zusätzliche Personalkosten
- Zusätzliche Vorhaltekosten für Fahrzeugmaterial“

Des Weiteren wird zwischen „tatsächlich nachweisbaren BEK infolge Zugfördermehraufwand [und] schwer nachweisbaren kommerziellen Verlusten (entgangene Gewinne)“ differenziert.

Fast alle genannten Quellen verbinden mit Betriebserschwerungskosten zusätzliche Kosten, die aufgrund eines veränderten Betriebes entstehen. Die BEK können dabei sowohl einen negativen (Verringerung der Kosten), als auch einen positiven (Erhöhung der Kosten) Wert annehmen.

Als Kosten wird der „bewertete Verzehr von wirtschaftlichen Gütern materieller und immaterieller Art zur Erstellung und zum Absatz von Sach- und/oder Dienstleistungen sowie zur Schaffung und Aufrechterhaltung der dafür notwendigen Teilkapazitäten“ bezeichnet (Springer Verlag). In Tabelle 3-4 sind die Inhalte der Finanzbuchhaltung (Aufwendungen und Erträge) und der Kosten- und Leistungsrechnung (Kosten und Leistungen) dargestellt. Die betriebsbezogenen Aufwendungen und Erträge werden in der Kosten- und Leistungsrechnung erfasst.

Tabelle 3-4: Inhalte der Finanzbuchhaltung und Kosten- und Leistungsrechnung (Jackisch 2006)

Finanzbuchhaltung	
Aufwendungen	Erträge
gesamter bewerteter Verzehr (Verbrauch) an Gütern, Dienstleistungen und Abgaben in einem Unternehmen innerhalb einer Abrechnungsperiode	gesamter erfolgswirksamer Wertezufluss in ein Unternehmen innerhalb einer Abrechnungsperiode
Kosten- und Leistungsrechnung	
Kosten	Leistungen
<ul style="list-style-type: none"> - betriebsbezogene Aufwendungen - Aufwendungen für Erstellung und Absatz der betrieblichen Leistung sowie für die Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft 	<ul style="list-style-type: none"> - betriebsbezogene Erträge - Ergebnis der betrieblichen Leistungserstellung und -verwertung

Bei Anwendung einer Maßnahme ergeben sich Änderungen im Betrieb. Daher wird die betriebsbezogene Kosten- und Leistungsrechnung angewendet. Hierbei kann nach Voll- und Teilkostenrechnung differenziert werden. Im Rahmen einer Teilkostenrechnung werden nur die Veränderungen der Kosten berechnet, die aufgrund einer Maßnahmenanwendung entstehen. Die Kosten, welche unabhängig von der Anwendung fix bleiben, werden in der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Oetting (2005), Lübke (2008) und Dickenbrok (2012) nennen als wesentliche Kosten eines EIU die Vorhaltung (Kapitaldienst und Erneuerungskosten), Instandhaltung und Betriebsführung. Des Weiteren kann nach Kosten und Erlösen der verschiedenen EIU unterschieden werden (Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik 2016b).

Oetting (2005), Lübke (2008) und Dickenbrok (2012) nennen als wesentliche Kosten eines EVU die Fahrzeugbeschaffung (Abschreibung und Verzinsung), Fahrzeuginstandhaltung, Energie-, Sach- und Betriebskosten sowie Personalkosten. Oetting (2005) führt die Trassenpreise, obwohl diese ebenfalls Kosten für ein EVU verursachen, nicht auf, da diese gleichzeitig als Erlöse bei einem EIU auftauchen und sich daher im System Bahn eliminieren.

Die Tabelle 3-5 gibt einen Überblick über die genannten Quellen und differenziert dabei nach EIU und EVU.

Tabelle 3-5: Kostendifferenzierung nach EIU und EVU

	EIU	EVU
Lübke (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - Vorhaltung - Instandhaltung <ul style="list-style-type: none"> o Inspektion o Wartung o Entstörung o Instandsetzung - Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeugkosten <ul style="list-style-type: none"> o Abschreibung/Zinsen o Instandhaltung - Personalkosten - Trassenpreise - Anlagen- und Stationspreise - Energiekosten
Dickenbrok (2012)	<ul style="list-style-type: none"> - Kapitaldienst <ul style="list-style-type: none"> o Abschreibung o Verzinsung - Instandhaltung - Betriebsführung - Gemeinkosten <ul style="list-style-type: none"> o Planung, Verwaltung o Unternehmensleitung o Stabsabteilungen o zentrale Einrichtungen o Steuern, Versicherungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapitaldienst <ul style="list-style-type: none"> o Abschreibung o Verzinsung - Instandhaltung - Energie - Personal (Tf, Zugbegleiter) - Trassen-/Stationsgebühren - Gemeinkosten <ul style="list-style-type: none"> o Verwaltungsaufwand o Vertrieb o Versicherungen
Oetting (2005)	<ul style="list-style-type: none"> - Erneuerung - Instandhaltung - Betriebsführung 	<ul style="list-style-type: none"> - Abfertigung und Zugbildung - Sach- und Gemeinkosten - Fahrzeugunterhaltung - Abschreibung / Verzinsung - Personal
Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik (2016b)	<p><u>Kosten Betreiber der Schienenwege</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Kostenblock Anlagen <ul style="list-style-type: none"> o Oberbau, Oberleitung o Bahnübergänge, LST o Ingenieurbau - Kostenblock Personal <ul style="list-style-type: none"> o Betriebspersonal o Instandhaltungspersonal o Administratives Personal <p><u>Kosten Stationsbetreiber</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Infrastruktur - Servicepersonal <p><u>Kosten Bahnenergieversorger</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Infrastruktur - Energieerzeugung und Einkauf 	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeuge <ul style="list-style-type: none"> o Anschaffung o Unterhaltung o Betrieb - Personal <ul style="list-style-type: none"> o Triebfahrzeugführer o Zugbegleiter o örtliches Personal o Disponenten o Werkstattpersonal o Verwaltung - Trassenpreise - ggf. Bonus-/ Maluszahlungen

Aus den genannten Quellen wird ersichtlich, dass verschiedene Kostendifferenzierungen existieren. Je nach Autor und Anwendungszweck sind diese entweder gröber oder feiner untergliedert.

Mit Hilfe der genannten Quellen wurden fünf Oberthemen (Kapitalkosten, Instandhaltungskosten, Betriebskosten, einmalige Kosten und Gemeinkosten) und zugehörige Unterthemen identifiziert. Mit der Differenzierung nach den genannten Oberthemen erfolgt die Beurteilung der monetären Maßnahmenauswirkung zur Schallreduktion.

Aus den Ober- und Unterthemen wurde ein gemeinsames Übersichtsbild für die Kostenarten eines EIU und eines EVU (siehe Abbildung 3-6) erstellt. Die Verwendung von unterschiedlichen Begrifflichkeiten ist entsprechend gekennzeichnet.

Die Kapitalkosten setzen sich bei beiden Unternehmen aus der Abschreibung und der Verzinsung zusammen.

Die Instandhaltungskosten beinhalten ebenfalls die gleichen Unterthemen: Entstörung, Wartung, Inspektion und Instandsetzung.

Bei den Betriebskosten sind die Unterthemen Personal, Energie und Verbrauchsstoffe sowohl beim EIU als auch beim EVU vorhanden. Beim EVU wird weiterhin nach Trassen-, Stations- und Anlagenpreisen differenziert.

Die einmaligen Kosten unterteilen sich in Rückbau (EIU) bzw. Demontage (EVU) und Entsorgung.

Die Gemeinkosten setzen sich aus den gleichen Unterthemen zusammen: Planung, Verwaltung, Unternehmensleitung, Steuern, Versicherungen und Vertrieb.

Für die jeweiligen Kostenarten werden in Kapitel 9 Formeln dargestellt, mit denen eine Berechnung der Veränderung der Kosten bei Anwendung einer Maßnahme erfolgen kann.

Da bei der Abbildung der Fokus auf die jeweiligen Kosten gelegt wurde, sind Erlöse (z. B. Einnahmen durch den Verkauf von Trassen oder Fahrscheinen) nicht enthalten.

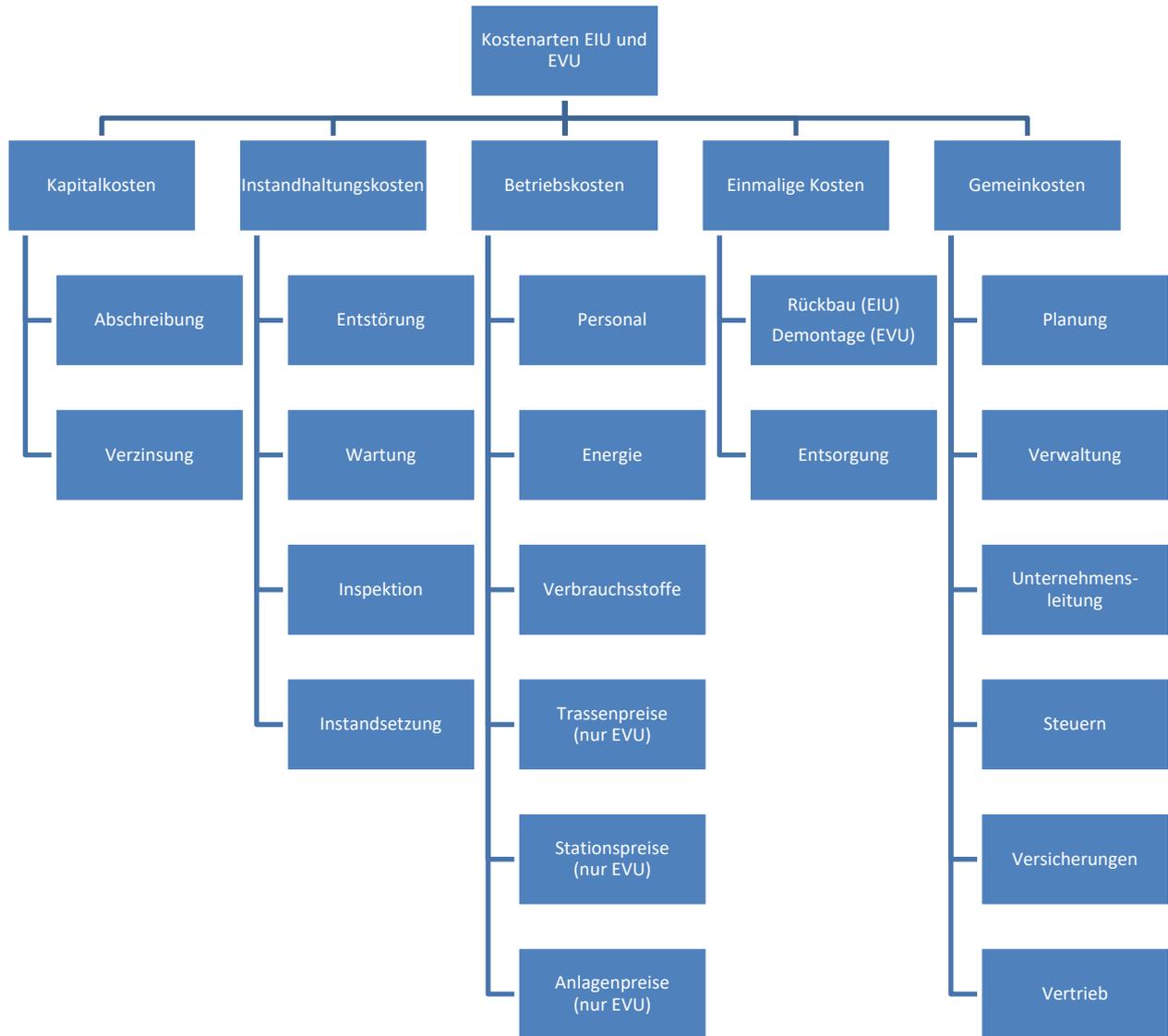


Abbildung 3-6: Übersichtsbild der Kostenarten eines EIU und EVU (eigene Darstellung)

3.11 Nutzen

Der Nutzen einer Maßnahme wird mit Hilfe der Berechnungsvorschrift der Schall 03 ermittelt (BMUB 2014). Dazu wird der Schalleistungspegel für eine bestimmte Betriebssituation (Modellzug auf Infrastruktur) zunächst ohne die Anwendung einer Maßnahme berechnet. Anschließend wird die Maßnahme angewendet und erneut der Pegel berechnet. Die Differenz zwischen den Pegeln ist der Nutzen der jeweiligen Maßnahme. Je nach Ausgangswerten und Maßnahme ergibt sich die Höhe der Differenz.

3.12 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden mit Hilfe einer Literaturrecherche die Grundlagen im Hinblick auf die in der Arbeit verwendeten Begriffsbezeichnungen dargelegt. Dabei ist zwischen Schall und Lärm sowie zwischen Emission, Transmission und Immission zu unterscheiden. Des Weiteren existiert eine Vielzahl von Akteuren mit unterschiedlichen Positionen und Zielen. Den Abschluss des Kapitels bilden die rechtlichen Grundlagen und die Betrachtung der Kapazität und Leistungsfähigkeit, Sperrzeit, Kosten im System Bahn und des Nutzens.

Auf die Begriffsbezeichnungen wird im weiteren Verlauf der Arbeit zurückgegriffen, um die im folgenden Kapitel beschriebene Aufgabenstellung zu bearbeiten.

4 Aufgabenstellung und Lösungsansatz

4.1 Aufgabenstellung

Für den Schienenverkehr werden für die kommenden Jahre steigende Verkehrszahlen prognostiziert (BMVI 2016b). In diesem Zusammenhang steigen ebenfalls die Emissionen und Immissionen und somit die Schallbelastung insgesamt. Damit müssen die in Kapitel 3.6 genannten Akteure umgehen und entsprechende Lösungsmöglichkeiten für eine Schallreduktion entwickeln.

Um diese Reduktion zu erreichen, existieren verschiedene Gruppen von Maßnahmen: So wird zwischen aktiven und passiven Maßnahmenarten unterschieden. Weiterhin können fahrweg- und fahrzeugseitige Maßnahmenarten differenziert werden. Eine weitere Gruppe bilden die Maßnahmenarten, die sich auf den Betrieb (Planung und/oder Durchführung) beziehen. Diese werden zurzeit nicht bzw. in nur sehr begrenztem Maße eingesetzt.

Ziel ist es, die Reduktion durch den Einsatz von Maßnahmenarten im Rahmen von eisenbahnbetrieblichen Konzepten zu untersuchen. Dabei stehen von den o. g. Maßnahmenarten diejenigen im Vordergrund, die sich auf die Planung (Fahrplan) und/oder auf die Durchführung (Betrieb) beziehen. Das Konzept umfasst dabei nicht die Umrüstung der Fahrzeuge auf LL-Sohlen (= fahrzeugseitige Maßnahmenart, s. o.), sondern beschreibt deren gezielte Berücksichtigung in der Planung bzw. Durchführung (= Einsatz von Wagen mit LL-Sohle). Somit schließen diese Maßnahmenarten die Lücke bei den drei Maßnahmengruppen zur Schallreduktion (siehe Abbildung 4-1).

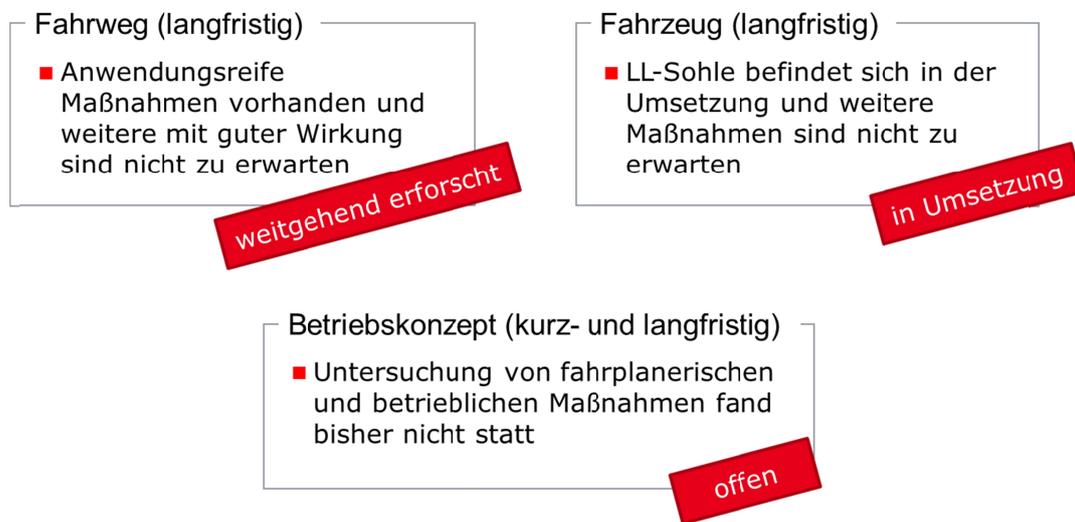


Abbildung 4-1: Übersicht über Maßnahmenarten zur Schallreduktion (eigene Darstellung)

In der Arbeit erfolgt eine monetäre Bewertung der angewendeten Maßnahmen. Dazu werden bestimmte Maßnahmen ausgewählt, deren Eignung mit spezifischen Einflussgrößen (z. B. aus dem Ort und der Zeit) dargestellt und deren Auswirkung mit Formeln berechnet. Dabei werden u. a. die Kriterien Kosten, betriebliche Wirkung und Nutzen monetär bewertet. Auf Grundlage dieser Bewertung erhält ein Anwender eine Unterstützung und kann anhand derer eine Entscheidung hinsichtlich des Einsatzes bestimmter Maßnahmen treffen.

Im Rahmen der monetären Bewertung sollen eine betriebswirtschaftliche Betrachtung durchgeführt und die veränderten Kosten im System Bahn berücksichtigt werden. Dies schließt eine volkswirtschaftliche Betrachtung und die Betrachtung von externen Kosten im Rahmen der Arbeit aus.

4.2 Inhaltliche Abgrenzung

In der Arbeit werden betriebliche Maßnahmenarten untersucht. Dies schließt die Untersuchung von Maßnahmenarten für den Fahrweg und Maßnahmen für das Fahrzeug (siehe Abbildung 4-1) aus. Deren Umsetzung ist zum einen langfristig, zum anderen sind die Maßnahmenarten weitgehend erforscht und befinden sich bereits in der Umsetzung. Die betrieblichen Maßnahmenarten können hingegen auch kurzfristig wirken und so deren Einsatz attraktiv machen. Hinzu kommt, dass diese Maßnahmenarten bisher kaum erforscht wurden. Dies betrifft sowohl deren Umsetzung, betriebliche Wirkung und den Nutzen der spezifischen Maßnahme.

Da durch den Einsatz von Betriebskonzepten eine Schallreduktion zunächst am Emissionsort (siehe Abbildung 4-2 und Kapitel 3) erreicht wird, findet auch dort die Untersuchung statt. Untersuchungen an den übrigen Orten sind nicht Bestandteil der Arbeit.

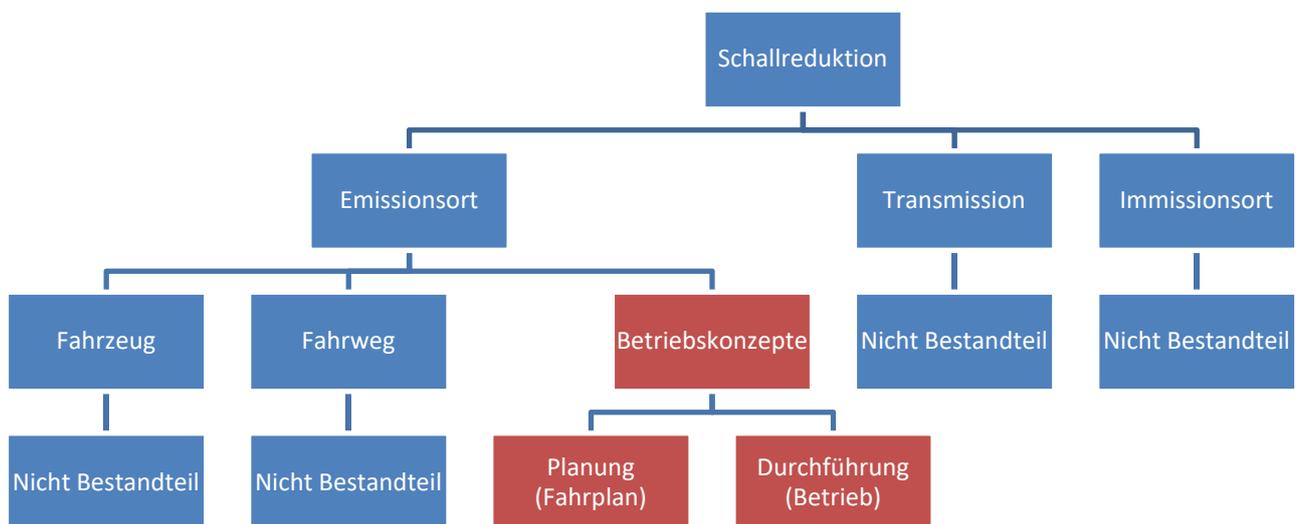


Abbildung 4-2: Schallreduktion nach Ort (eigene Darstellung)

Eine Schallreduktion durch bereits vorhandene infrastrukturelle oder fahrzeugseitige Komponenten (siehe Kapitel 2.2 und 2.3) wird nicht berücksichtigt.

Eine Berechnung der Änderung der Leistungsfähigkeit in Bahnhöfen sowie die Bewertung der Kombination von mehr als zwei Maßnahmen (n-m-Beziehung) erfolgt ebenfalls nicht.

4.3 Definitionen im Sinne dieser Arbeit

Im Folgenden werden Begriffe definiert, die entweder häufig verwendet werden oder deren Definition gegenüber der ursprünglichen Definition im Hinblick auf die vorliegende Arbeit erweitert wurde. Hierbei sollen die Anpassungen möglichst gering ausfallen.

4.3.1 Betriebskonzept

Bisher wird der Begriff des „Betriebskonzeptes“ nicht einheitlich verwendet bzw. ist nicht vorhanden (siehe Kapitel 2.5). Daher wird eine Definition, welche im Rahmen der Arbeit gilt, dargelegt.

In einem Betriebskonzept werden schallmindernde Maßnahmen in der Planung und Durchführung von Zugfahrten beschrieben. Die Beschreibung umfasst dabei die Informationen, die bereits im Rahmen eines Betriebsprogramm zur Durchführung des Bahnbetriebs (siehe Kapitel 2.5) erhoben werden, und die Informationen, die zu einer Reduktion der Schallemissionen benötigt werden. Der Einsatz der schallmindernden Maßnahmenarten hat Auswirkungen auf das Fahrplankonzept und die zugehörigen Fahrplanregelungen, sodass diese neu erstellt oder angepasst werden müssen. Dieses wird bisher im Zusammenhang mit Baubetriebsmaßnahmen und deren Auswirkungen verwendet. Da die Auswirkungen von Baubetriebsmaßnahmen und Maßnahmen zur Schallreduktion sehr ähnlich sind (z. B. Verlängerung der Fahrzeit oder Einschränkung der Infrastruktur), kommen die Fahrplanregelungen hier ebenfalls zur Anwendung. Die Fahrplanregelungen werden dann bei der Erstellung eines Fahrplans berücksichtigt. Daraus ergeben sich abweichende örtlich zulässige Geschwindigkeiten und infolgedessen veränderte Fahrzeiten bzw. Fahrpläne. Die Definition eines Fahrplans (siehe Kapitel 2.5) bleibt davon unberührt.

Ein Betriebskonzept legt weiterhin fest, wann, wo und wie die schallmindernden Maßnahmen in der Planung und Durchführung eingesetzt werden. Somit ist es durchaus möglich, dass für eine Strecke verschiedene Betriebskonzepte (z. B. je nach Tageszeit) existieren. Des Weiteren können sich die Betriebskonzepte von zwei ähnlichen Strecken gleichen. Wie die schallmindernden Maßnahmen eingesetzt werden, ist jeweils im Einzelfall festzulegen.

4.3.2 Maßnahmenart vs. Maßnahme

Im Sinne dieser Arbeit werden Maßnahmen in einer Maßnahmenart zusammengefasst. So ist die Verringerung der Höchstgeschwindigkeit eine Maßnahmenart. Die dazugehörige Maßnahme legt den genauen Wert der Verringerung und somit die „neue“ Höchstgeschwindigkeit (z. B. 80 km/h) fest. Eine Maßnahme greift somit in den betrieblichen Ablauf des Systems Bahn mit dem Ziel ein, die Schallemissionen zu reduzieren.

Eine Maßnahme kann eine oder mehrere Ausprägungen aufweisen. Als Ausprägung wird in diesem Sinne die Einschränkung einer Maßnahmenart beim Einsatz verstanden. So kann eine Maßnahme z. B. auf die Tageszeit, einen bestimmten Zug, eine bestimmte Strecke oder einen bestimmten Ort wirken.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die bisherigen Maßnahmen zur Schallreduktion (siehe Kapitel 2) anders definiert sind, als in dieser Arbeit (s. o.). Dort wird in Summe von „Maßnahmen“ gesprochen ohne eine genauere Spezifizierung vorzunehmen. Diese ist aber notwendig, um einzelne Maßnahmen einer Maßnahmenart zuzuordnen.

4.3.3 Strecke, Kante und Knoten

Die DB Netz AG unterscheidet u. a. zwischen Strecke, Kante und Knoten. (DB Netz AG 2008)

Da Emissionen überall, also sowohl auf einer Strecke oder Kante und in einem Knoten, auftreten können, erfolgt die Entwicklung der Maßnahmenarten unabhängig vom Ort der Schallemissionen.

Im Rahmen des Schemas zur detaillierten Bewertung wird u. a. die betriebliche Wirkung und dort die Veränderung der Nennleistung (siehe Kapitel 3.8) monetär bewertet. Die Berechnung der Nennleistung erfolgt mit einem fiktiven Betriebsprogramm auf einer fiktiven Beispielstrecke. Die Strecke ist in mehrere Streckenabschnitte unterteilt. Per Definition besitzen die Abschnitte alle die

gleichen Eigenschaften (z. B. Zugzahl, Höchstgeschwindigkeit, Länge), sodass im Rahmen der Arbeit die Begriffe Strecke und Streckenabschnitt synonym verwendet werden.

Die Maßgabe, dass bei Leistungsuntersuchungen mit analytischen Methoden eine Strecke in Teilstrecken zu unterteilen ist, wenn sich das Betriebsprogramm um mehr als 10 % ändert, wird im Rahmen der Arbeit nicht umgesetzt (DB Netz AG 2008).

4.3.4 Wagen

Als Wagen wird nach DIN EN 13452-1 (Deutsches Institut für Normung e. V. 2003) ein Einzelwagen mit seinen Fahrwerken definiert (siehe Tabelle 4-1). Für die Berechnung der Schallemission im Rahmen der Schall 03 (BMUB 2014) wird u. a. die Anzahl der Wagen in einem Zug (s. u.) benötigt.

4.3.5 Fahrzeug

Ein Fahrzeug ist nach DIN EN 13452-1 (Deutsches Institut für Normung e. V. 2003) als kleinste betriebsfähige Einheit definiert (siehe Tabelle 4-1).

4.3.6 Zug

Ein Zug „bezieht sich auf jeden Verband, der betrieben werden kann, bestehend entweder aus einem einzelnen Wagen oder einem oder mehreren gekuppelten Fahrzeugen“ (Deutsches Institut für Normung e. V. 2003) (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Begriffsbezeichnungen des rollenden Materials (Deutsches Institut für Normung e. V. 2003)

mit Gelenk		ohne Gelenk	
Wagen	siehe Fahrzeug	Wagen	Einzelwagen mit seinen Fahrwerken
Fahrzeug	kleinste betriebsfähige Einheit	Fahrzeug	kleinste betriebsfähige Einheit
Zug	bezieht sich auf jeden Verband, der betrieben werden kann, bestehend aus einem oder mehreren gekuppelten Fahrzeugen	Zug	bezieht sich auf jeden Verband, der betrieben werden kann, bestehend entweder aus einem einzelnen Wagen oder einem oder mehreren gekuppelten Fahrzeugen

4.4 Anforderungen

Die im Rahmen der Arbeit zu entwickelnden Maßnahmenarten und deren Maßnahmen sollen die im Folgenden beschriebenen Anforderungen erfüllen. Die Anforderungen wurden mit Hilfe eines Brainstormings zusammen mit der DB Netz AG am 05.09.2016 erarbeitet.

Um von vornherein keine Maßnahme auszuschließen, soll deren Einsatz umfassend sein. Das bedeutet, dass sie sowohl von EIU als auch von EVU eingesetzt werden können. Eine strikte Trennung zwischen diesen beiden Unternehmen bezüglich des Einsatzes von Maßnahmen ist nicht erforderlich.

Ebenso sollen die Maßnahmen diskriminierungsfrei sein. Dies wird zum einen vom Gesetzgeber (Bundesrepublik Deutschland 2016c) gefordert, zum anderen erleichtert es den Einsatz der Maßnahmen. Somit erfolgt in der Arbeit keine Unterscheidung hinsichtlich der verschiedenen Akteure und auch nicht bezüglich der beteiligten Unternehmen.

Die Maßnahmen sollen zunächst unabhängig von z. B. Zeit oder Ort sein. Diesbezügliche Einschränkungen für den Einsatz von Maßnahmen entstehen erst durch die Einbeziehung dieser Dimensionen.

Zur Vergleichbarkeit soll die Bewertung der Maßnahmen anhand von einheitlichen Kriterien erfolgen. Somit können zwei oder mehrere Maßnahmen miteinander verglichen werden und der Anwender erhält eine Entscheidungshilfe hinsichtlich des Einsatzes der Maßnahme.

Die dazu erstellten Formeln und Eingabewerte sollen nachvollziehbar und verständlich gestaltet sein. Dies begünstigt deren Anwendung.

Die entwickelten Maßnahmen sollen einen Bezug zur Realität aufweisen, damit sie durch DB Netz AG eingesetzt werden können.

4.5 Methoden

Mittels Literaturrecherche wurden zunächst bereits existierende Maßnahmenarten am Fahrweg und Fahrzeug zusammengestellt. Aus der Recherche ging außerdem hervor, dass bisher sehr wenige Maßnahmenarten in der Planung oder der Durchführung des Betriebes existieren. Bestehende Maßnahmenarten sollen weiterentwickelt werden (z. B. Anschaffung leiserer Triebfahrzeuge und Wagen), um diese dann in einem Betriebskonzept (z. B. Einsatz leiser Triebfahrzeuge und Wagen forcieren) einzusetzen.

Des Weiteren werden die Maßnahmenarten mit Hilfe eines Brainstormings entwickelt. Dabei spielte es zunächst keine Rolle, ob diese realistisch und damit umsetzbar sind oder nicht. Der Vorteil eines Brainstormings ist, dass ohne Einschränkungen gearbeitet wird. Diese ergeben sich u. U. erst im Verlauf der weiteren Ausarbeitung. Als gleichzeitiger Nachteil der Methode kann genannt werden, dass die Vollständigkeit nicht sichergestellt werden kann.

Die Vollständigkeit wird im weiteren Verlauf mit den Methoden Top-Down und Bottom-Up sichergestellt. Dazu werden Oberbegriffe ermittelt und die Maßnahmenarten entsprechend zugeordnet (Top-Down). Bei Bottom-Up wird in entgegengesetzter Richtung verfahren und die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten zu Oberbegriffen zusammengefasst. Die Ergebnisse beider Methoden werden in einem Übersichtsbild zusammengeführt.

Die Maßnahmenarten werden zunächst grob und in der weiteren Bearbeitung detailliert bewertet. Im Rahmen der Grobbewertung werden keine Berechnungen hinsichtlich des Nutzens oder der Kosten bei Umsetzung der Maßnahmenarten durchgeführt. Das Ergebnis der Grobbewertung ist die Reduzierung der Anzahl der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten auf die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten. Für diese werden im Rahmen der detaillierten Bewertung Berechnungen durchgeführt und so die jeweilige Maßnahmenart beschrieben. Dabei werden bestimmte Einflussgrößen variiert, um die Sensitivität einzelner Maßnahmen zu bestimmen.

Die detaillierte Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten enthält auch Formeln zur Berechnung der Auswirkungen bei Anwendung einer Maßnahme. Mit Hilfe der Formeln werden die Kosten, die betriebliche Wirkung und der Nutzen einer Maßnahme monetär berechnet. Damit wird für jede Maßnahme ein Nutzen-Kosten-Verhältnis gebildet. Dem Anwender wird somit eine Entscheidungshilfe zur Auswahl einer Maßnahme gegeben. Die Formeln sind, so weit wie möglich, allgemeingültig gehalten, sodass die jeweiligen Ausprägungen bei Anwendung einer Maßnahme berücksichtigt werden.

4.6 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist, wie in Abbildung 4-3 dargestellt, aufgebaut.

In Kapitel 5 erfolgt die Ermittlung und Entwicklung der Maßnahmenarten. Es wird darauf geachtet, dass Maßnahmenarten für die Planung und/oder die Durchführung identifiziert werden.

Die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten werden in Kapitel 7 grob beschrieben. Mit Hilfe eines groben Bewertungsschemas aus Kapitel 6 erfolgt in Kapitel 8 die Bewertung der Maßnahmenarten. Dabei werden positiv bewertete Maßnahmenarten weiter untersucht. Demgegenüber werden neutrale oder negativ bewertete Maßnahmenarten verworfen.

Die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten werden in Kapitel 10 detailliert beschrieben. Dabei werden mögliche Einsatzfälle und die jeweiligen Ausprägungen der Eigenschaften genannt. Mit dem entwickelten Schema zur detaillierten Bewertung aus Kapitel 9 erfolgt in Kapitel 11 die Bewertung der Maßnahmenarten. Das Schema enthält Formeln für die einzelnen Kriterien, mit denen eine Monetarisierung einer Maßnahme möglich wird.

Im Rahmen eines realen Einsatzfalls werden die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten in Kapitel 12 beispielhaft eingesetzt und deren Auswirkungen beschrieben.

Abschließend werden in Kapitel 13 die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf in einem Ausblick aufgezeigt.

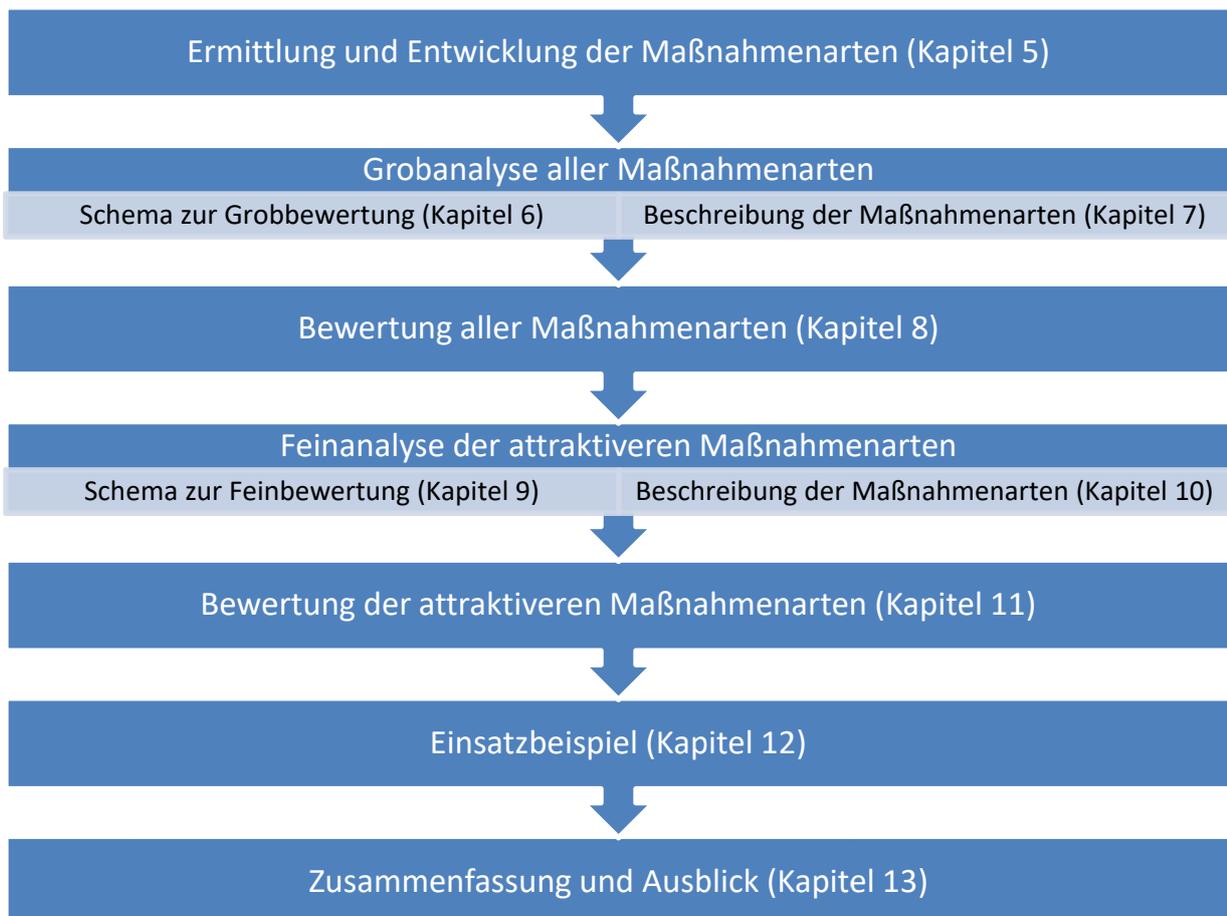


Abbildung 4-3: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

5 Ermittlung und Entwicklung der Maßnahmenarten

5.1 Einleitung

Nachdem in Kapitel 4 die Aufgabenstellung und der Lösungsansatz beschrieben worden sind, folgt nun die Ermittlung und Entwicklung der Maßnahmenarten. Diese wurde derart gestaltet, dass sowohl ein EIU als auch ein EVU die Maßnahmenarten einsetzen kann. Des Weiteren wurde keine Unterscheidung zwischen Planung (Fahrplan) und Durchführung (Betrieb) vorgenommen, da angenommen wird, dass sich bei Einsatz der Maßnahmenarten stets eine positive Auswirkung auf die Schallemission ergibt.

Die Definitionen einer *Maßnahmenart* und einer *Maßnahme* wurden bereits in Kapitel 4.3.1 dargelegt. In den Kapiteln 5.2 und 5.3 wird die Ermittlung und Entwicklung der Maßnahmenarten beschrieben. Damit wird ein Übersichtsbild aller Maßnahmenarten in Kapitel 5.4 gebildet. Die Dimensionen einer Maßnahmenart werden in Kapitel 5.5 beschrieben. Den Abschluss bildet das Kapitel 5.6 mit einer Zusammenfassung.

5.2 Ermittlung der Maßnahmenarten

Die Ermittlung der Maßnahmenarten soll zum einen sicherstellen, dass keine Maßnahmenarten weiter beschrieben werden, die bereits Bestandteil der bestehenden Gruppen von Maßnahmen (Fahrweg oder Fahrzeug, siehe Kapitel 4.2) sind. So ist zum Beispiel die Anschaffung von leiseren Triebfahrzeugen keine Maßnahmenart, die weiter beschrieben wird. Demgegenüber ist der forcierte Einsatz leiserer Triebfahrzeuge im Rahmen der Planung eine Maßnahmenart, die untersucht wird.

Zum anderen wurde mit Hilfe der Ermittlung darauf geachtet, dass aufgrund von z. B. örtlichen Verhältnissen Maßnahmenarten nicht von vornherein ausgeschlossen werden. Ob eine Maßnahmenart überall eingesetzt werden kann oder nur an bestimmten Orten, ist von den Eigenschaften der Maßnahmenart und des jeweiligen Einsatzortes abhängig. Des Weiteren soll die Ermittlung der Maßnahmenarten zunächst frei von aktuellen rechtlichen Restriktionen erfolgen.

Die mit Hilfe eines Brainstormings ermittelten Maßnahmenarten (siehe Anlage 1) werden dann mit den Methoden Top-Down und Bottom-Up im Rahmen der Entwicklung der Maßnahmenarten weiter ausgearbeitet und Ober- sowie Unterthemen definiert.

5.3 Entwicklung der Maßnahmenarten

Die mit Hilfe des Brainstormings identifizierten Maßnahmenarten werden weiterentwickelt bzw. ausgearbeitet. Dies schließt die Anwendung der Methoden *Top-Down* und *Bottom-Up* ein. Damit werden zum einen die Vollständigkeit der Maßnahmenarten sichergestellt und für diese entsprechende Oberthemen identifiziert. Die Methoden *Top-Down* und *Bottom-Up* werden u. a. für den relationalen Datenbankentwurf verwendet (Elmasri und Navathe 2009). Je nach Methode, wird dabei mit einer geringen Abstraktionsebene (z. B. Unterthemen) begonnen und diese Schritt für Schritt zu größeren Gruppen (z. B. Oberthemen) zusammengefasst oder einer hohen Abstraktionsebene begonnen und diese nach und nach detailliert (Elmasri und Navathe 2009).

Die genannten Methoden sind in den folgenden Kapiteln kurz beschrieben.

5.3.1 Top-Down

Bei Top-Down werden zunächst aus einer Obergruppe mehrere Untergruppen gebildet. Die Untergruppen spalten sich solange weiter auf, bis ein einzelnes Attribut direkt beschrieben werden kann (z. B. (Elmasri und Navathe 2009), (Ferstl und Sinz 2001)). Ein Attribut bezeichnet „bestimmte Eigenschaften einer Entität“ (Elmasri und Navathe 2009).

„Auf der ersten Modellierungsebene werden Datenobjekttypen gebildet und in Beziehung gesetzt“ (Ferstl und Sinz 2001). In den weiteren Modellierungsebenen „werden den Datenobjekttypen Attribute zugeordnet“ (Ferstl und Sinz 2001). Ein möglicher Anfang für die Anwendung von Top-Down auf die vorliegende Arbeit ist in Abbildung 5-1 dargestellt. In der 1. Modellierungsebene steht das Ziel „Betriebliche Reduktion von Schallemissionen“. Dieses wird in der 2. Modellierungsebene in die Oberthemen „Änderung der Zugcharakteristik“ und „Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg“ unterteilt. Die 3. Modellierungsebene unterteilt die Oberthemen in zugehörige Unterthemen weiter auf. In Abbildung 5-1 ist dies für einen Teil der Themen beispielhaft dargestellt. Eine Übersicht aller Maßnahmen mit den jeweiligen Ober- und Unterthemen ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

Ein Vorteil von Top-Down ist, dass das Ziel von Anfang an durch den feststehenden Oberbegriff („Betriebliche Reduktion von Schallemissionen“) klar definiert ist.

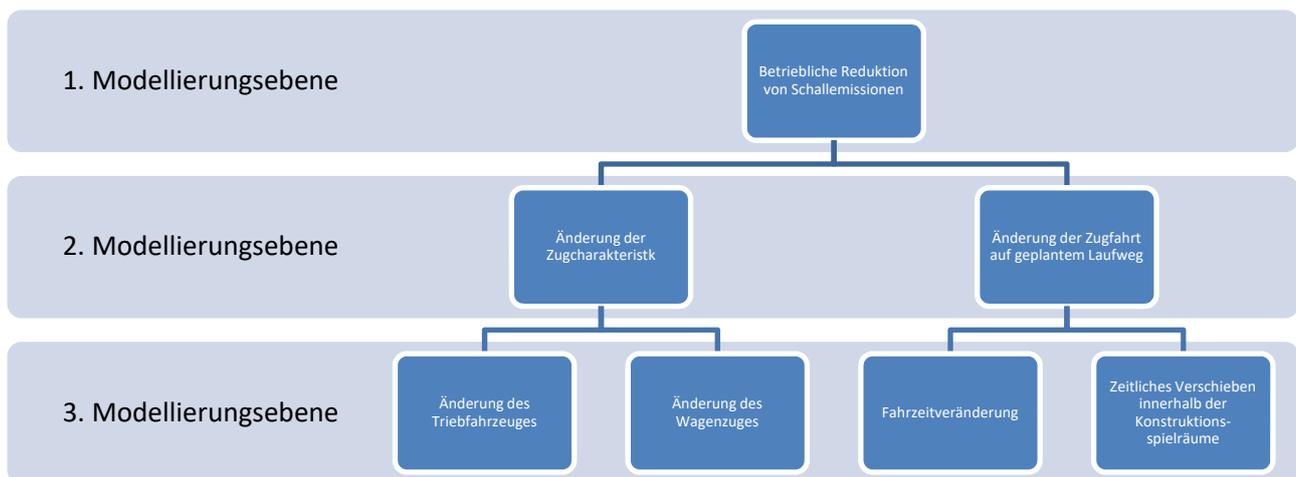


Abbildung 5-1: Top-Down (eigene Darstellung)

5.3.2 Bottom-Up

Im Gegensatz zu Top-Down wird bei Bottom-Up in genau entgegengesetzter Richtung verfahren. Hier wird mit einem Schema begonnen, das „grundlegende Abstraktionen enthält“ (Elmasri und Navathe 2009). Es werden „Basisbeziehungen zwischen einzelnen Attributen als Ausgangspunkt [benutzt] und [diese] zur Definition von Relationen [verwendet]“ (Elmasri und Navathe 2009).

Im Vergleich zu Top-Down (siehe Abbildung 5-1) sind in Abbildung 5-2 die Modellierungsebenen eins und drei vertauscht worden. Es wurde zunächst mit den Unterthemen („Änderung des Triebfahrzeuges“, „Änderung des Wagenzuges“, etc.) begonnen und diese in Oberthemen zusammengefasst. Alle Oberthemen bilden zusammen das Ziel „Betriebliche Reduktion von Schallemissionen“ (3. Modellierungsebene).

Als Vorteil kann der von Beginn an sehr große Detaillierungsgrad genannt werden. Ein Nachteil ist die erforderliche „Sammlung einer großen Zahl binärer Attributbeziehungen als Ausgangspunkt“ (Elmasri und Navathe 2009).

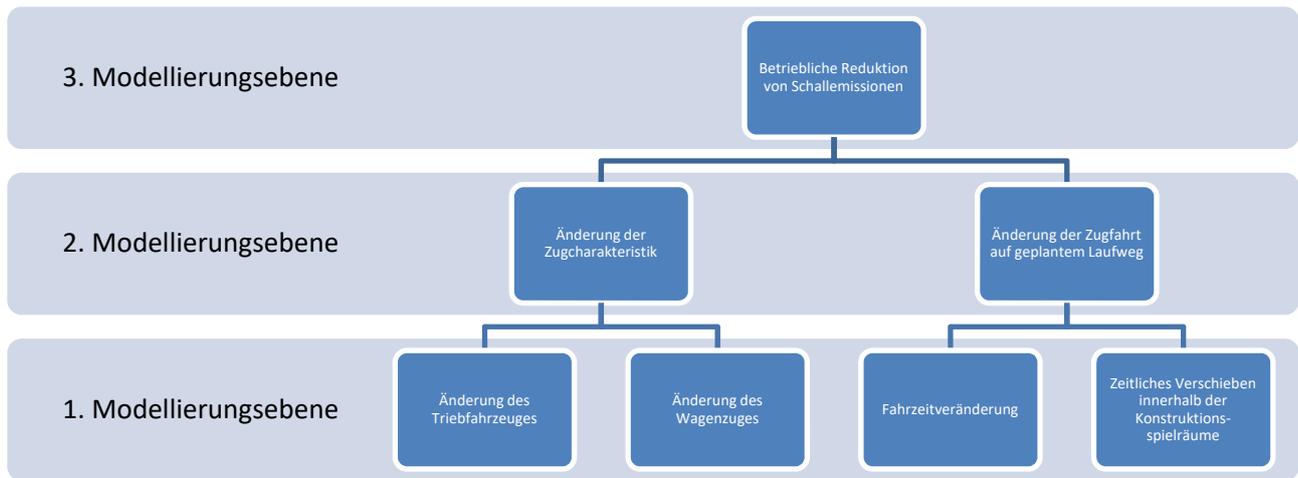


Abbildung 5-2: Bottom-Up (eigene Darstellung)

Sowohl Top-Down als auch Bottom-Up lassen sich mittels Struktogrammen darstellen (Ferstl und Sinz 2001). Als Beispiel können die Jackson-Methode oder Nassi-Shneiderman-Diagramme genannt werden (Elmasri und Navathe 2009). Der Einsatz solch grafischer Darstellungsmittel ist besonders bei kleinen und damit begrenzt komplexen Programmen sinnvoll. Wenn das entsprechende Programm komplexer wird oder generell komplex aufgebaut ist, wird diese Form der Darstellung schnell unübersichtlich und nur noch sehr schwer handhabbar (Claus und Schwill 2001).

Wie in Abbildung 5-1 dargestellt, erfolgt bei der Top-Down-Methode die Modellierung „von oben nach unten“. Dies kehrt sich bei der Bottom-Up-Methode in die Modellierung „von unten nach oben“ um. Werden nun beide Methoden angewendet, kann damit die Vollständigkeit möglichst weitgehend sichergestellt werden (siehe Abbildung 5-3).

5.4 Übersichtsbild zu den Maßnahmenarten

Zur Erstellung des Übersichtsbildes der Maßnahmenarten wurden, wie bereits oben beschrieben, die Methoden Top-Down und Bottom-Up verwendet. Da aus dem Brainstorming eine ungeordnete Liste von Maßnahmenarten vorliegt, wurden diese zunächst in Unterthemen zusammengefasst. Die Unterthemen wiederum wurden Oberthemen zugeordnet. Die Oberthemen wurden dann zum Ziel „Betriebliche Reduktion von Schallemissionen“ zusammengefasst. Diese Einteilung wurde mit der zweiten Richtung überprüft. Dort wurden aus dem Ziel „Betriebliche Reduktion von Schallemissionen“ Oberthemen abgeleitet. Diesen Oberthemen wurden Unterthemen zugeordnet und für jedes Unterthema entsprechende Maßnahmenarten gesucht.

Damit wurde zum einen überprüft, ob in beiden Richtungen dieselben Maßnahmenarten, Unter- und Oberthemen identifiziert wurden. Zum anderen konnten bei Abweichungen Ergänzungen vorgenommen werden und somit das Übersichtsbild vervollständigt werden.

In der Abbildung 5-3 ist zu erkennen, dass für die jeweiligen Maßnahmenarten folgende Ober- und Unterthemen existieren:

- Änderung der Zugcharakteristik
 - Änderung des Triebfahrzeuges
 - Änderung des Wagenzuges
- Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg
 - Fahrzeitveränderung
 - Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume
- Änderung des Laufwegs
 - Umleitung unter erleichterten Bedingungen
 - Umleitung
- (Teil-)Ausfall
 - Teilausfall
 - Ausfall

Das Oberthema *Änderung der Zugcharakteristik* enthält Maßnahmenarten, die bei einem bestimmten Zug zum Einsatz kommen. Die Unterthemen *Änderung des Triebfahrzeuges* und *Änderung des Wagenzuges* gliedern sich jeweils in Art, Anzahl und Position.

Die drei folgenden Oberthemen umfassen Konfliktlösungsalternativen aus dem Eisenbahnbetrieb (DB Netz AG 2009a). Dabei kann es zu einer *Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg*, einer *Änderung des Laufwegs* oder einem *(Teil-)Ausfall* kommen.

Die *Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg* setzt sich aus der *Fahrzeitveränderung* und dem *Zeitlichen Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume* zusammen. Das Unterthema *Fahrzeitveränderung* gliedert sich in die Maßnahmenarten Beschleunigen, Beharren, Auslaufen, Bremsen, Halt und Geschwindigkeitsprofil. Das Unterthema *Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume* besitzt keine weitere Untergliederung. Durch die Beachtung der Konstruktionsspielräume entfällt die Rücksprache mit dem EVU.

Die *Änderung des Laufwegs* enthält die *Umleitung unter erleichterten Bedingungen* und die *Umleitung* ohne weitere Untergliederungen.

Der *(Teil-)Ausfall* umfasst den *Teilausfall* und den *Ausfall* ohne weitere Untergliederungen.

Die jeweiligen Maßnahmenarten mit den Unter- und Oberthemen sind in Anlage 3 dargestellt. Insgesamt wurden 32 verschiedene Maßnahmenarten identifiziert.

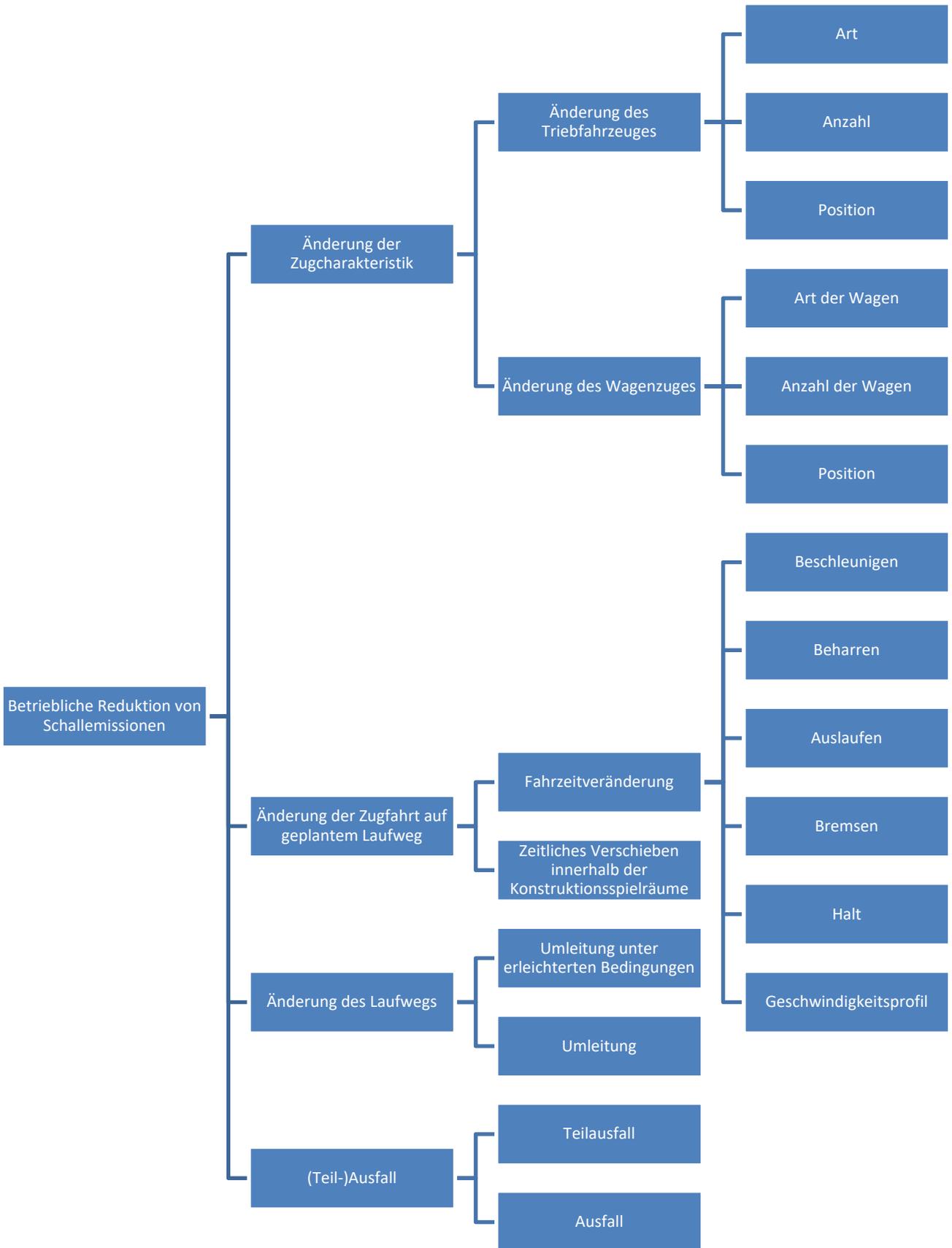


Abbildung 5-3: Übersichtsbild zu den Maßnahmenarten (eigene Darstellung)

5.5 Dimensionen einer Maßnahmenart

5.5.1 Festlegung der Dimensionen

Wie bereits in Kapitel 4.4 beschrieben, sollen die Maßnahmenarten die dort genannten Anforderungen erfüllen. Dazu zählt auch, dass eine Maßnahme zunächst unabhängig von z. B. Zeit oder Ort ist. Durch die Einbeziehung dieser Dimensionen entstehen hinsichtlich der Anwendung einer Maßnahme Einschränkungen. Entweder werden durch eine Maßnahme bestimmte Dimensionen bedient oder die Einsatzmöglichkeiten einer Maßnahme werden durch bestimmte Dimensionen beschränkt.

In Kapitel 3.6 wurden die verschiedenen Akteure vorgestellt. Daraus lassen sich zwei wesentliche Akteure, die von den Maßnahmen am stärksten beeinflusst werden, ablesen. Das sind das EIU und die verschiedenen EVU. Deshalb wird die Dimension *Maßnahmenadressat* gebildet.

Abele et al. (2017) unterscheidet folgende Anwendungsgebiete von Maßnahmen:

- „Maßnahmen zur Verkehrsreduzierung, die auf die Verringerung der Verkehrsleistung (Fahrzeug * km) abzielen.
- Maßnahmen zur räumlichen Verkehrsverlagerung, die auf die Beeinflussung der Quell- und Zielwahl des Güterverkehrs abzielen, um die Transportleistung (tkm) zu reduzieren.
- Maßnahmen zur zeitlichen Verschiebung des Verkehrs, die darauf abzielen, die zeitliche Streuung des Verkehrsaufkommens (Fahrzeug/h) zu verändern.
- Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung, die darauf abzielen, die modale Aufteilung (%) zu ändern.
- Maßnahmen zur Verkehrssteuerung, die darauf abzielen, einen effizienten Umgang mit dem Verkehr unter Berücksichtigung verschiedener Parameter wie Verkehrsfluss oder Umweltindikatoren zu schaffen.“ (Abele et al. 2017)

In o. g. Aufzählung tauchen der Ort („räumliche Verkehrsverlagerung“) und die Zeit („zeitliche Verschiebung“) zum Einsatz einer Maßnahme auf. Des Weiteren werden Maßnahmen nach Verkehrsreduzierung, –verlagerung und –steuerung unterschieden.

Der Ort und die Zeit spielen beim Einsatz einer Maßnahme eine wichtige Rolle. Daher werden die Dimensionen *Zeitliche Komponente* und *Örtliche Komponente* eingeführt.

Die in Abele et al. (2017) beschriebenen Maßnahmen zur Verkehrsreduzierung, –verlagerung und -steuerung, werden nicht als eigenständige Dimension aufgenommen, da diese durch den Einsatz der Maßnahmen erreicht werden. So führen die Maßnahmen zu einer Reduzierung, Verlagerung und Steuerung des Verkehrs.

Um eine Maßnahme durchzusetzen, müssen geeignete Instrumente angewendet werden, damit der Maßnahmenadressat (s. o.) diese entsprechend umsetzt. Die Instrumente zur Umsetzung werden in der Dimension *Ordnungsrechtliche Art der Durchsetzung* beschrieben.

Aus der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 4.1) geht hervor, dass eine Schallreduktion durch den Einsatz von Maßnahmenarten im Rahmen von eisenbahnbetrieblichen Konzepten erreicht werden soll. Daraus lässt sich die Dimension *Planung und/oder Durchführung* herleiten.

Eine Maßnahme wird demzufolge durch folgende Dimensionen charakterisiert:

- Maßnahmenadressat
- Zeitliche Komponente
- Örtliche Komponente
- Ordnungsrechtliche Art der Durchsetzung
- Planung und/oder Durchführung

Die einzelnen Dimensionen sind im Folgenden kurz beschrieben.

5.5.2 Maßnahmenadressat

Die Umsetzung einer Maßnahmenart erfolgt durch die *Maßnahmenadressaten*. Diese sind das EIU, das EVU oder beide. Die Auswirkungen bei der Umsetzung hängen von der jeweiligen Maßnahme und dem Adressaten/den Adressaten ab. So kann z. B. eine Geschwindigkeitsveränderung für bestimmte Wagen- (z. B. offene, gedeckte, Rungen- oder Flachwagen) oder Zugarten (z. B. kombinierter Verkehr, Ganzzüge oder Einzelwagen) gelten. Es ist stets sicherzustellen, dass keine Diskriminierung bei Anwendung einer Maßnahme (siehe Kapitel 4.4) vorliegt.

5.5.3 Zeitliche Komponente

Die *zeitliche Komponente* gibt an, wann z. B. eine Geschwindigkeitsveränderung (s. o.) gilt. Dabei kann z. B. nach folgenden Zeiträumen unterschieden werden:

- Vormittag/Nachmittag/Abend/Nacht
- Tag/Abend/Nacht
- Tag/Nacht
- Hauptverkehrszeit/Nebenverkehrszeit

Wann welche Einteilung gewählt wird, hängt von der Strecke und deren Betriebsprogramm ab. So ist z. B. eine Geschwindigkeitsbeschränkung nachts (22:00 – 06:00 Uhr), wie bei einer Straße, möglich. Diese Beschränkung würde dann für alle verkehrenden Züge gelten und so zu einer verringerten Leistungsfähigkeit der Strecke führen. Da nachts die zulässigen Schallemissionen niedriger liegen als tagsüber, könnte eine nächtliche Geschwindigkeitsbeschränkung sinnvoll sein. Dies kann in Kombination mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf der parallel verlaufenden Straße angewendet werden. Es können auch bestimmte Stundengruppen vorgesehen werden, in denen eine Maßnahme zur Anwendung kommt, um so andere Stundengruppen entsprechend zu entlasten. Die Schall 03 unterscheidet die Beurteilungszeiträume Tag (06:00 – 22:00 Uhr) und Nacht (22:00 – 06:00 Uhr) (BMUB 2014). Dementsprechend können die Maßnahmen entweder am Tag, in der Nacht oder in beiden Zeiträumen angewendet werden.

Neben der zeitlichen Geschwindigkeitsveränderung über einen Tag kann ebenfalls zwischen den Wochentagen unterschieden werden. Folgende Zeiträume können hier beispielsweise abgegrenzt werden:

- Werktage/Sonntage
- Montag bis Freitag/Samstag und Sonntag
- Montag bis Donnerstag/Freitag bis Sonntag

Auch hier hängt die Einteilung von der Strecke und dem Betriebsprogramm ab. So kann z. B. an verkehrsschwachen Tagen eine größere Geschwindigkeitsveränderung realisiert werden als an verkehrsstarken Tagen, da die Leistungsfähigkeit in geringerem Maße beeinflusst wird. Im Rahmen der Arbeit wird keine Unterscheidung hinsichtlich des Wochentages vorgenommen.

5.5.4 Örtliche Komponente

Ebenso wie der Zeitraum hat der Ort Einfluss auf die Anwendung einer Maßnahme. Dies wird mit der *örtlichen Komponente* festgelegt und kann für einen Streckenabschnitt oder eine gesamte Strecke gelten. Gegebenenfalls muss die Strecke in Teilstrecken unterteilt werden, wenn sich das Betriebsprogramm um mehr als 10 % ändert (siehe Kapitel 4.3.3) und sich somit andere Schallemissionen ergeben. Diese Unterteilung wird in der vorliegenden Arbeit nicht vorgenommen. Des Weiteren ist auch eine Unterteilung bezüglich der Schallempfindlichkeit des Streckenabschnitts (z. B. bebautes oder nicht bebautes Gebiet) denkbar.

Die Wahl des Ortes, für den eine Maßnahme gilt, hängt von den örtlichen Gegebenheiten (z. B. Vorhandensein einer Oberleitung, Vorhandensein einer großen Neigung) und dem Betriebsprogramm der Strecke ab.

5.5.5 Ordnungsrechtliche Art der Durchsetzung

Abele nennt zur Durchsetzung einer Maßnahme Verbote, Gebühren, Anreize, Beratungen und Schulungen (Abele et al. 2017).

Dazu zählen auch:

- „Erteilung von Richtlinien und Vorschriften [...]
- Preisermittlungsmaßnahmen zur Beeinflussung der Modalwahl, die Zeitwahl oder die Routenwahl [...]
- Anwendung von weichen Maßnahmen wie Empfehlungen sowie Maßnahmen zur Information, Kommunikation, Organisation und Koordination“ (Abele et al. 2017)

In Kloepfer et al. (2006) werden die in Tabelle 5-1 dargestellten Instrumente der Lärmpolitik zur Lärmreduktion unterschieden.

Tabelle 5-1: Instrumente der Lärmpolitik (Kloepfer et al. 2006)

	Verkehrsvermeidung bzw. Verkehrsverringerung	Lärmreduktion am Verkehrsmittel	Lärmschutz bei den Betroffenen
Straßenverkehr	<i>Ordnungsrecht</i> Fahrverbote bzw. -beschränkungen, Betriebsberechtigungen für Pkw <i>Ökon. Instrumente</i> Straßennutzungsgebühren, Lärmabhängige Trassenpreise	<i>Ordnungsrecht</i> Zulassungsvorschriften <i>Ökon. Instrumente</i> Lärmemissionsabgabe, modifizierte Kfz-Steuer	<i>Ordnungsrecht</i> Bau- bzw. Nachrüstungsauflagen, Verkehrswegeplanung <i>Ökon. Instrumente</i> Subventionen für Lärmschutz
Schienenverkehr	<i>Ordnungsrecht</i> Ge- und Verbote <i>Ökon. Instrumente</i> Handelbare Lärmkontingente auf Trassen	Ordnungsrecht Zulassungsvorschriften	<i>Ökon. Instrumente</i> Subventionen für passiven Lärmschutz
Luftverkehr	<i>Ordnungsrecht</i> Ge- und Verbote, Kontingentierungen <i>Ökon. Instrumente</i> Kerosinsteuer	<i>Ordnungsrecht</i> Zulassungsvorschriften <i>Ökon. Instrumente</i> Landegebühren	<i>Ökon. Instrumente</i> Subventionen für passiven Schallschutz

Auf Grundlage der o. g. Quellen werden folgende *ordnungsrechtliche Arten der Durchsetzung* bei der Maßnahmenumsetzung eingeführt:

- Anreiz
- Gebot
- Verbot
- Erlaubnis
- Kontingentierung

Je nachdem, welche Maßnahmenart eingesetzt werden soll, ergeben sich eine oder mehrere Arten der Durchsetzung. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen: Der Kauf oder der Einsatz von schallarmen Fahrzeugen kann mit einem monetären Anreiz versehen werden. Das dazugehörige Gebot könnte deren Einsatz verlangen, ihn aber nicht zwingend vorschreiben. Demgegenüber können auf einer Strecke bestimmte Fahrzeuge (z. B. Wagen mit Grauguss-Bremssohlen) verboten oder aber der Einsatz bestimmter Fahrzeuge (z. B. Wagen mit Verbundstoff-Bremssohlen) erlaubt werden. Eine Kontingentierung könnte beim Erreichen einer bestimmten Obergrenze (z. B. gefahrene Züge oder Summe der Schallemissionen) gewählt werden.

Die ordnungsrechtliche Art der Durchsetzung muss immer diskriminierungsfrei (siehe Kapitel 4.3.3) sein. Weiterhin ist in der Praxis zu klären, wie die Überwachung zur Einhaltung der Maßnahmen und die Sanktionierung bei Nichteinhaltung durchgeführt werden.

Der Inhalt und die Anwendung der ordnungsrechtlichen Arten der Durchsetzung ist nicht Bestandteil der Arbeit.

5.5.6 Planung und/oder Durchführung

Eine Maßnahme kann entweder in der *Planung (Fahrplan)* und der *Durchführung (Betrieb)* oder nur in der Durchführung wirken. Dies hängt wiederum von der jeweiligen Maßnahme ab. Während der Fahrplanerstellung lassen sich die Maßnahmen genauer und besser planen als im laufenden Betrieb. Somit können die Auswirkungen durch den Einsatz einer Maßnahme im Fahrplan besser berechnet werden als im Betrieb. So kann z. B. eine Geschwindigkeitsreduzierung oder ein Fahrverbot für bestimmte Fahrzeuge im Fahrplan eingearbeitet werden und ist somit für alle Beteiligten veröffentlicht. Demgegenüber könnte o. g. Kontingentierung ad-hoc im Betrieb zum Einsatz kommen, je nachdem welche Obergrenze erreicht wurde.

Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Maßnahmenarten können sowohl in der Planung und Durchführung als auch nur in der Durchführung angewendet werden.

5.6 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Ermittlung der Maßnahmenarten wurde zum einen eine Abgrenzung zu bereits bestehenden Maßnahmen am Fahrweg und Fahrzeug sichergestellt. Zum anderen wurde darauf geachtet, dass keine Maßnahmenarten von vornherein ausgeschlossen wurden. Die so gefundenen Maßnahmenarten wurden mit den Methoden Top-Down und Bottom-Up weiterentwickelt und in Ober- und Unterthemen zusammengefasst. Somit konnten die Maßnahmenarten identifiziert und das Übersichtsbild erstellt werden.

Im folgenden Kapitel wird das Schema zur Grobbewertung entwickelt, mit dessen Hilfe die Bewertung der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten durchgeführt wird.

6 Entwicklung eines Schemas zur Grobbewertung

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird das Schema zur Grobbewertung erläutert. Mit Hilfe des Schemas wird die Bewertung der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten (siehe Kapitel 5) durchgeführt und damit deren Anzahl auf die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten reduziert.

Die Grobbewertung der Maßnahmenarten und das Ergebnis sind in Kapitel 8 dargestellt.

6.2 Schema zur Grobbewertung

Das Schema zur Grobbewertung dient der Vorauswahl hinsichtlich der Realisierbarkeit und grundsätzlichen Eignung einer bestimmten Maßnahmenart. Für die Bewertung sind Kriterien erforderlich, die die Auswirkungen des Einsatzes beschreiben. Es ergeben sich somit ein Zustand vor dem Einsatz und ein Zustand mit dem Einsatz einer Maßnahmenart. Zwischen diesen beiden Zuständen bestehen Unterschiede, die mit den Kriterien zu bewerten sind. Um gleichzeitig den Nutzen und die Kosten einer Maßnahmenart bewerten zu können, wird eine Mischform aus einer Nutzwertanalyse und einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse verwendet (Schulte-Zurhausen 2010).

Zunächst ergeben sich unterschiedliche Kosten. Daraus leitet sich das Bewertungskriterium *Kosten* ab. Für die Implementierung und Umsetzung einer Maßnahmenart muss Kapital eingesetzt werden. Des Weiteren ergeben sich Kosten aufgrund einer geänderten Betriebsführung. Die Höhe hängt von der gewählten Maßnahmenart ab. Es ergeben sich ebenso Änderungen hinsichtlich der Fahrzeit und Kapazität (*betriebliche Wirkung*). Beim Einsatz einer Maßnahmenart ergibt sich eine Veränderung der Schallemissionen gegenüber dem Ausgangszustand. Dies wird mit dem Kriterium *Nutzen* bewertet. Die Kriterien *Kosten* und *Nutzen* werden mit dem Kriterium *Nutzen-Kosten-Verhältnis* aufgewertet, da die Maßnahmenarten von wirtschaftlich ausgerichteten Unternehmen eingesetzt werden und die genannten Kriterien daher entsprechend relevant sind. Da es sich um eine praktische Anwendung handelt, sollen die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten ebenfalls im Hinblick auf deren Einsatz bewertet werden. Dies erfolgt mit dem Kriterium *Umsetzbarkeit*.

Schulte-Zurhausen (2010) bewertet die Verbesserungen bestehender Prozesse mit dem Kriterium Qualitätsverbesserung. Da die monetäre Bewertung dieses Kriteriums im Rahmen der Arbeit nicht möglich ist, erfolgt diesbezüglich keine weitere Betrachtung.

Somit ergeben sich für das Schema der Grobbewertung folgende fünf Kriterien:

- Kosten
- betriebliche Wirkung
- Nutzen
- Nutzen-Kosten-Verhältnis
- Umsetzbarkeit

Um die genannten Kriterien zu bewerten, wird eine positive („+“, Maßnahmenart geeignet), eine negative („-“, Maßnahmenart nicht geeignet) und eine neutrale („o“, wertfreie Einschätzung) Bewertung eingeführt. Dabei kommt es auf das Kriterium und die jeweilige Maßnahmenart an, welche Bewertung gewählt wird (siehe Unterkapitel zu den Kriterien).

Im Folgenden werden die Kriterien einzeln kurz beschrieben.

6.2.1 Kosten

Mit dem Kriterium *Kosten* wird eine Einschätzung hinsichtlich der Kosten bei Umsetzung einer Maßnahmenart getroffen. Dabei werden die verschiedenen Kostenarten (siehe Kapitel 3.10) grob abgeschätzt. Im Rahmen der Grobbewertung werden die Bewertungen neutral und negativ vergeben, da angenommen wird, dass die Umsetzung einer Maßnahmenart stets mit Kosten verbunden ist (siehe Kriterium *Nutzen*). Eine negative Bewertung wird vergeben, wenn hohe Kosten zu erwarten sind. Dies ist z. B. bei einem forcierten Einsatz leiserer Triebfahrzeuge, personalintensiven Maßnahmenarten und Maßnahmenarten mit hohem Planungsaufwand der Fall. Die restlichen Maßnahmenarten erhalten eine neutrale Bewertung.

6.2.2 Betriebliche Wirkung

Das Kriterium *betriebliche Wirkung* bewertet die Veränderung der Kapazität aufgrund veränderter Fahrzeiten bei Einsatz einer Maßnahmenart. Eine positive Bewertung wird vergeben, wenn die Kapazität erhöht wird. Eine negative Bewertung wird vergeben, wenn die Kapazität verringert wird. Die restlichen Maßnahmenarten erhalten eine neutrale Bewertung.

Die Bewertung orientiert sich an den Ausführungen in Kapitel 3.8.

6.2.3 Nutzen

Mit dem Kriterium *Nutzen* wird eine erste Einschätzung hinsichtlich der zu erreichenden dB(A)-Reduktion getroffen. Diese soll im Rahmen der Grobbewertung, wie auch bei dem Kriterium *Kosten*, nur abgeschätzt werden. Im Rahmen der Grobbewertung werden die Bewertungen positiv und neutral vergeben, da angenommen wird, dass die Umsetzung einer Maßnahmenart stets mit einer Reduktion der Schallemissionen verbunden ist (siehe Kriterium *Kosten*). Eine positive Bewertung wird vergeben, wenn eine wahrnehmbare Schallreduktion (≥ 3 dB(A), siehe Kapitel 3.2) zu erwarten ist. Die restlichen Maßnahmenarten erhalten eine neutrale Bewertung.

6.2.4 Nutzen-Kosten-Verhältnis

Das Nutzen-Kosten-Verhältnis fasst die Bewertung der Kriterien *Kosten* und *Nutzen* zusammen. Dabei können sich die in Tabelle 6-1 dargestellten Ergebnisse und Kombinationen ergeben.

Tabelle 6-1: Kombinationen und Ergebnisse des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (eigene Darstellung)

Nummer	Kosten	Nutzen	Nutzen-Kosten-Verhältnis
1	+	+	+
2	+	o	+
3	+	-	o
4	o	+	+
5	o	o	o
6	o	-	-
7	-	+	o
8	-	o	-
9	-	-	-

Da sowohl das Ergebnis des Nutzen-Kosten-Verhältnisses als auch der Nutzen und die Kosten in die Endbewertung eingehen, erfolgt eine Aufwertung der Kriterien *Nutzen* und *Kosten*. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass sowohl der Nutzen als auch die Kosten als die wichtigsten Kriterien bei der Umsetzung einer Maßnahmenart angesehen werden.

In Tabelle 6-1 sind alle möglichen Kombinationen der Kriterien *Kosten* und *Nutzen* dargestellt. Das Ergebnis des Nutzen-Kosten-Verhältnisses wird bei

- zwei positiven Bewertungen positiv
- einer positiven Bewertung und einer neutralen Bewertung positiv
- einer positiven Bewertung und einer negativen Bewertung neutral
- zwei neutralen Bewertungen neutral
- einer neutralen Bewertung und einer negativen Bewertung negativ
- zwei negativen Bewertungen negativ

Aufgrund der Einschränkungen in den Kapiteln 6.2.1 (keine positive Bewertung bei *Kosten*) und 6.2.3 (keine negative Bewertung bei *Nutzen*) existieren die Kombinationen in den Zeilen 1, 2, 3, 6 und 9 nicht, und es verbleiben die in Tabelle 6-2 dargestellten Kombinationen.

Tabelle 6-2: Bereinigte Kombinationen und Ergebnisse des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (eigene Darstellung)

Zeile	Kosten	Nutzen	Nutzen-Kosten-Verhältnis
4	o	+	+
5	o	o	o
7	-	+	o
8	-	o	-

6.2.5 Umsetzbarkeit

Die Umsetzbarkeit wird in zwei Unterbewertungen aufgeteilt. Die erste Unterbewertung leitet sich aus dem praktischen Einsatz der Maßnahmenarten ab. Diese sollen möglichst im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG eingesetzt werden können. Daneben spielt die Dauer bis zur Umsetzung eine wichtige Rolle für die Unternehmen, die die Maßnahmenarten einsetzen. Daraus leitet sich die zweite Unterbewertung ab. Die Unterbewertungen sind:

1. Ist eine Maßnahmenart uneingeschränkt umsetzbar/machbar?
2. Wie lange dauert die Umsetzung der Maßnahmenart?

Zu 1.)

Ist eine Maßnahmenart uneingeschränkt umsetzbar/machbar, wird eine positive Bewertung vergeben. Ist eine Maßnahmenart nicht uneingeschränkt umsetzbar (z. B. Umleitungsstrecke ist nur für bestimmte Züge zugelassen), wird eine negative Bewertung vergeben.

Zu 2.)

Kann eine Maßnahmenart z. B. unterjährig (Maßnahmenart für einen Zug im Betrieb) eingesetzt werden, wird eine positive Bewertung vergeben. Nimmt die Umsetzung viel Zeit in Anspruch, da für die Maßnahmenart z. B. umfangreiche Planungen stattfinden müssen, wird eine negative Bewertung vergeben. Eine neutrale Bewertung ist hier nicht vorgesehen, da die Dauer bis zur Umsetzung nur grob abgeschätzt werden kann und keine Genauigkeit vorgetäuscht werden soll.

Wie oben dargestellt werden für die Unterbewertungen zwei Ausprägungen (positiv und negativ) verwendet. Das Ergebnis der ersten Unterbewertung kann durch die zweite Unterbewertung verbessert, bestätigt oder verschlechtert werden (siehe Tabelle 6-3). Aus den zwei Unterbewertungen wird dann das Ergebnis des Kriteriums *Umsetzbarkeit* gemittelt. Dabei kann ein neutrales Ergebnis erzielt werden.

Tabelle 6-3: Ergebnisse und Kombinationen des Kriteriums Umsetzbarkeit (eigene Darstellung)

1. Unterbewertung	2. Unterbewertung	Ergebnis
+	+	+
+	-	o
-	+	o
-	-	-

Optional könnte noch mit Hilfe einer dritten Unterbewertung der Zeitpunkt des Einsetzens einer spürbaren Reduktion bei einer Maßnahmenart bewertet werden. Setzt diese schnell ein, wird eine positive Bewertung vergeben. Setzt die Reduktion erst spät ein, wird eine negative Bewertung vergeben. So könnte z. B. das Auslaufen detaillierter bewertet werden. Die Umsetzung dieser Maßnahmenart nimmt zwar viel Zeit in Anspruch (siehe 2. Unterbewertung), da viele Triebfahrzeugführer geschult werden müssten. Sobald aber ein Triebfahrzeugführer das Auslaufen umsetzt, wird eine Reduktion erreicht.

Die beschriebene dritte Unterbewertung wird nicht eingeführt, da der Zeitpunkt nicht nur von der Befolgung der Maßnahmenart durch z. B. den Triebfahrzeugführer abhängt, sondern auch externe Einflüsse eine Rolle spielen.

6.3 Zusammenfassung

Mit dem in diesem Kapitel beschriebenen Schema zur Grobbewertung und der Unterteilung in verschiedene Kriterien lassen sich die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten grob bewerten. Um die Grobbewertung durchführen zu können, werden zunächst die Maßnahmenarten und deren Maßnahmen beschrieben. Dies erfolgt im folgenden Kapitel.



7 Beschreibung der Maßnahmenarten

7.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten (siehe Kapitel 5) beschrieben, um mit dem erarbeiteten Schema (siehe Kapitel 6) in Kapitel 8 die Grobbewertung durchzuführen. Zur Beschreibung der verschiedenen Maßnahmenarten wird zunächst ein einheitlicher Steckbrief entwickelt. Der Steckbrief bildet die Grundlage zur Beschreibung und Grobbewertung der einzelnen Maßnahmenarten.

Ziel des Kapitels ist, die Maßnahmenarten und ihre jeweiligen Eigenschaften darzustellen. Primär ist dabei das Erreichen einer Schallreduktion bei Einsatz einer oder mehrerer Maßnahmenarten. Es spielt zunächst keine Rolle, welche Höhe der Reduktion erreicht wird oder in welchem Maße der Betrieb durch die Maßnahmenart beeinträchtigt wird. Dies wird im Rahmen der Bewertung der Maßnahmenarten (siehe Kapitel 8 und 11) behandelt.

7.2 Einheitlicher Steckbrief

Mit dem einheitlichen Steckbrief werden die Maßnahmenarten beschrieben, um einen kurzen Überblick über die jeweilige Maßnahmenart zu geben. Der Steckbrief enthält ebenfalls das Ergebnis des einheitlichen Schemas zur Grobbewertung (siehe Kapitel 6). Somit ist eine Vergleichbarkeit unter den Maßnahmenarten möglich. Das Ziel ist, mit dem Steckbrief und der Bewertung eine erste Einschätzung jeder Maßnahmenart hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung zur Schallreduktion zu ermöglichen. Die Steckbriefe der einzelnen Maßnahmenarten sind in den Anlagen 4 bis 9 dargestellt.

Im Steckbrief werden nachfolgend dargestellte Inhalte behandelt.

7.2.1 Beschreibung

Jede Maßnahmenart wird mit ca. 150 Wörtern bzw. 1.000 Zeichen kurz beschrieben. Dabei wird die Maßnahmenart, die Voraussetzungen zur Umsetzung und deren Auswirkungen bei der Umsetzung skizziert. Die Beschreibung dient dazu, einen Überblick über die Maßnahmenart zu erhalten.

7.2.2 Kosten

Die Kosten der einzelnen Maßnahmenarten werden grob abgeschätzt. Dies spiegelt sich in den Bewertungen „neutral“ und „negativ“ wider. Dabei ist die Höhe der einzelnen Kostenarten (Kapitalkosten, Instandhaltungskosten, etc.) maßnahmenartspezifisch. Die Höhe der anfallenden Kosten wird im Rahmen der detaillierten Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten mit Formeln berechnet. Der Text umfasst hier ca. 50 Wörter bzw. 300 Zeichen.

7.2.3 Betriebliche Wirkung

Im Rahmen der Umsetzung einer Maßnahmenart können sich Änderungen bezüglich der Belastung (Anzahl von Zügen), der zeitlichen Belegung durch Züge (Minuten, Stunden) und damit der Leistungsfähigkeit ergeben (DB Netz AG 2008). Die Höhe dieser Veränderungen und damit deren betriebliche Wirkung werden hier bewertet. Die genaue Höhe der Veränderung wird dann bei der detaillierten Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten errechnet. Der Text umfasst hier ebenfalls ca. 50 Wörter bzw. 300 Zeichen.

7.2.4 Nutzen

Mit dem Kriterium Nutzen wird das Erreichen einer Schallreduktion bei Umsetzung einer Maßnahmenart bewertet. Sobald eine Maßnahme eingesetzt ist, wird davon ausgegangen, dass dadurch eine Schallreduktion erzielt wird. Die Höhe der Reduktion wird dann bei der detaillierten Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten errechnet. Hier umfasst der Text ebenso ca. 50 Wörter bzw. 300 Zeichen.

7.2.5 Umsetzbarkeit

Die Bewertung der Umsetzbarkeit wird in zwei Stufen vorgenommen:

1. Ist eine Maßnahmenart uneingeschränkt umsetzbar/machbar?
2. Wie lange dauert die Umsetzung der Maßnahmenart?

Zu 1.)

Die Antwort auf die Frage hängt von der jeweiligen Maßnahmenart ab. Entsprechend wird die Grobbewertung vorgenommen. Zum Beispiel wird für eine Maßnahmenart, die im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG eingesetzt werden kann, eine positive Bewertung vergeben.

Zu 2.)

Hier hängt die Antwort auf die Frage ebenfalls von der jeweiligen Maßnahmenart ab. Nimmt zum Beispiel die Umsetzung der Maßnahmenart, bis diese eine Reduktion der Schallemission bewirkt, viel Zeit in Anspruch, erfolgt eine negative Bewertung.

Der Text umfasst ca. 50 Wörter bzw. 300 Zeichen.

7.2.6 Grobbewertung

Die o. g. Punkte werden „positiv“, „neutral“ oder „negativ“ bewertet. Die jeweiligen Bewertungen sind auf den einzelnen Steckbriefen vermerkt. Eine ausführliche Beschreibung der Grobbewertung ist in Kapitel 6 dargestellt.

7.3 Maßnahmenarten

In den folgenden Kapiteln (7.4 bis 7.7) werden die Inhalte der einzelnen Maßnahmenarten in der Reihenfolge des Übersichtsbildes (siehe Abbildung 5-3) beschrieben:

- Änderung der Zugcharakteristik
- Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg
- Änderung des Laufwegs
- (Teil-)Ausfall

Es werden sowohl die Ober- als auch die Unterthemen genannt und erläutert.

7.4 Änderung der Zugcharakteristik

Zunächst werden Maßnahmenarten beschrieben, die sich auf die Eigenschaften eines einzigen Zuges (Triebfahrzeug und/oder Wagenzug) beziehen. Sollen die Maßnahmenarten bei mehreren Zügen eingesetzt werden, so muss jeder einzelne Zug die entsprechende Maßnahmenart zugewiesen bekommen. Eine Kombination mit den anderen genannten Maßnahmenarten (s. u.) ist möglich. Das Oberthema *Änderung der Zugcharakteristik* ist in die Unterthemen *Änderung des Triebfahrzeuges* und *Änderung des Wagenzuges* unterteilt. Die zugehörigen Maßnahmenarten werden im Folgenden beschrieben.

7.4.1 Änderung des Triebfahrzeuges

Das Unterthema *Änderung des Triebfahrzeuges* ist untergliedert in *Art*, *Anzahl* und *Position*. Die Maßnahmen der Maßnahmenart beziehen sich auf ein einzelnes Triebfahrzeug. Es wird nicht zwischen Triebfahrzeugen, Triebwagen, Triebzügen oder selbstfahrenden Spezialfahrzeugen für bahnbetriebliche Aufgaben unterschieden.

Art

Hier wurden drei mögliche Maßnahmenarten identifiziert:

- mehr E-Traktion statt V-Traktion
- einzelne Schallquellen am Fahrzeug zeitweise eliminieren
- Zweikraftlok: E-Lok und Brennstoffzelle zusätzlich

Die 1. Maßnahmenart zielt auf die Verringerung der Verbrennungsfahrzeuge ab. Dazu sollen bevorzugt elektrische Traktionen zum Einsatz kommen. Um mit elektrischer Traktion fahren zu können, muss eine Oberleitung vorhanden sein und das Triebfahrzeug die anliegende Spannung verarbeiten können. Die „TSI Lärm“ legt u. a. für Elektro- und Diesellokomotiven Grenzwerte für das Stand-, Anfahr-, Vorbeifahr- und Innengeräusch im Führerstand fest (Europäische Union 2014). Für E-Loks gelten niedrigere Werte als für V-Loks. Daraus wird die Schlussfolgerung gezogen, dass E-Loks einen geringeren Schallpegel erzeugen als V-Loks. Ein weiterer positiver Nebeneffekt wäre die Reduzierung der Abgasbelastung der Motoren und des bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehende Kohlenstoffdioxid (CO₂). Die Deutsche Bahn AG setzt im Schienenpersonenfernverkehr erneuerbare Energien ein und hat damit eine Verringerung der CO₂-Emissionen erreicht (Deutsche Bahn AG 2015).

Mit der 2. Maßnahmenart sollen einzelne Schallquellen am Fahrzeug zeitweise eliminiert werden. Dazu zählen z. B. Lüfter oder Fahrmotoren. Dies kann z. B. bei Einfahrt in eine Betriebsstelle oder beim Abstellen des Triebfahrzeuges erfolgen. Dazu muss die Position des Triebfahrzeuges bekannt sein, damit die Abschaltung entsprechend erfolgen kann. Mit der Abschaltung kann auch eine Energieeinsparung erreicht werden.

Die 3. Maßnahmenart zielt auf den Einsatz von Zweikraftlokomotiven ab. Dabei kann eine E-Lok zusätzlich mit einer Brennstoffzelle ausgestattet werden. Diese Lokomotiven können dann bei der Planung bevorzugt werden. Damit kann sowohl eine Schallreduktion als auch eine Verringerung des Energieverbrauchs erreicht werden.

Anzahl

Die Anzahl der Triebfahrzeuge kann mit der Maßnahmenart „weniger Triebfahrzeuge durch mehr Leistung pro Triebfahrzeug“ reduziert werden. In der Planung ist darauf zu achten, leistungsstärkere Triebfahrzeuge bevorzugt einzuplanen und im Betrieb einzusetzen. So können z. B. Doppeltraktionen bei Zügen vermieden werden. Sinnvoll ist hier, eine Verbindung zum Wagenzug herzustellen, um das optimale Triebfahrzeug im Hinblick auf die Leistung einzusetzen.

Position

Die Position mehrerer Triebfahrzeuge kann folgende Ausprägungen annehmen:

- Zugspitze und Zugende
- Zugspitze und Zugmitte
- Doppeltraktion

Die Maßnahmen Zugspitze und Zugende sowie Doppeltraktion werden bereits heute angewendet. Es besteht allerdings noch Handlungsbedarf hinsichtlich des optimalen Einsatzes. Bei Fahrt mit Doppeltraktion muss eine entsprechende Auslastung der Motoren sichergestellt werden. Das bedeutet umgekehrt, dass eine Zugfahrt mit mehreren Traktionen vermieden werden kann, wenn z. B. der Wagenzug entsprechend angepasst oder ein leistungsstärkeres Triebfahrzeug (s. o.) eingesetzt wird.

7.4.2 Änderung des Wagenzuges

Das Unterthema *Änderung des Wagenzuges* ist untergliedert in *Art der Wagen*, *Anzahl der Wagen* und *Position*. Die unten genannten Maßnahmenarten beziehen sich auf den Wagenzug einer Zugfahrt. Der Fokus liegt auf Wagen des Schienengüterverkehrs, da diese gegenüber dem Schienenpersonenverkehr heterogener sind.

Art der Wagen

Die Art der Wagen und das verwendete Bremssystem fließen in die Berechnung des Schallleistungspegels nach Schall 03 ein und stellen somit Möglichkeiten zur Schallreduktion dar.

Sind genügend Wagen mit einer bestimmten Eigenschaft vorhanden, so können daraus Gruppen innerhalb eines Zuges gebildet werden. Dies gilt sowohl für Wagen die das Schallniveau positiv, als auch negativ beeinflussen. Somit können Gruppen mit z. B. einheitlicher Wagengröße, Wagenform oder Wagenmaterial gebildet werden. Des Weiteren können Gruppen aus rein lauten oder leisen Wagen zusammengestellt werden.

Es wurden zwei mögliche Maßnahmenarten identifiziert:

- komplett leiser Zug
 - nur leise und neue Wagen und keine lauten und alten Wagen
 - nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen
- Kombination aus leisen und lauten Wagen

Die 1. Maßnahmenart („komplett leiser Zug“) weist zwei Untermaßnahmenarten (s. o.) auf. Die 1. Untermaßnahmenart zielt auf den bevorzugten Einsatz von leisen und neuen Wagen. Damit soll der

Einsatz von lauten und alten Wagen weitestgehend vermieden werden. Der Einsatz der Untermaßnahmenart kann bereits in der Planung eines EVU erfolgen, indem auf den Einsatz von leisen und neuen Wagen geachtet wird. In der TSI Lärm ist für Güterwagen der Grenzwert für das Vorbeifahrgeräusch bei 80 km/h mit 83 dB angegeben (Europäische Union 2014). Es wird angenommen, dass Wagen neuerer Bauart diesen Grenzwert einhalten und Wagen älterer Bauart diesen Grenzwert nicht einhalten. Ein geräuscharmer Zug besteht „zu mindestens 90 % aus geräuscharmen Wagen“. Demgegenüber besteht ein geräuschintensiver Zug „zu mehr als 10 % aus geräuschintensiven Wagen“. Die Begriffsbezeichnung „geräuscharme Wagen“ bezeichnet „neue oder vorhandene Wagen, die die in der TSI Lärm [s. o.] aufgeführten einschlägigen Lärmgrenzwerte erfüllen“. Dagegen bezeichnet die Begriffsbezeichnung „geräuschintensive Wagen“ Wagen, „die die in der TSI Lärm aufgeführten einschlägigen Lärmgrenzwerte nicht erfüllen“. Die Wagen und Triebfahrzeuge, deren Lärmemissionen „mindestens 3 dB unter den in der TSI Lärm festgelegten einschlägigen Werten“ liegen, werden als „sehr leise Wagen und Lokomotiven“ bezeichnet. (Europäische Union 2015)

Das Schienenlärmschutzgesetz (siehe Kapitel 3.7.2) legt fest: „Ein Güterzug, der mindestens einen lauten Güterwagen umfasst, geht in die Berechnung als vollständig aus lauten Güterwagen bestehender Zug ein. Bei der Berechnung eines lauten Güterzugs sind ausschließlich Güterwagen nach Anlage 2 Beiblatt 1 Kategorie 10 Zeile 2 oder 15 Verkehrslärmschutzverordnung zu berücksichtigen“ (Deutsche Bahn AG 2017b).

Die 2. Untermaßnahmenart ähnelt der 1. Untermaßnahmenart. Der Fokus liegt nun auf dem Einsatz von Wagen mit leisen und neuen Bremsen gegenüber lauten und alten Bremsen. Die Bremsen älterer Bauart rauhen die Fahrflächen der Radsätze bei Bremsungen auf. Dadurch werden die Rauheit der Schiene und die Schallemission erhöht. Dies ist bei Bremsen neuerer Bauart nicht der Fall. Als neuere Bauart kann z. B. der Einsatz einer Scheibenbremse in Betracht gezogen werden. Der Einsatz dieser Untermaßnahmenart kann bereits in der Planung (siehe 1. Untermaßnahmenart) erfolgen. Dabei weisen Wagen mit neueren Bremsen eine geringere Schallemission auf, als Wagen mit Bremsen älterer Bauart.

Die 2. Maßnahmenart ist eine Verknüpfung aus den beiden Untermaßnahmenarten. Dabei werden leise und laute Wagen in einem Zug in Gruppen kombiniert. Aus welchen Gründen die Wagen leise oder laut sind, spielt dabei keine Rolle. So können z. B. laute Wagen direkt hinter einem lauten Triebfahrzeug und leise Wagen am Ende des Zuges angeordnet werden (siehe *Position*).

Anzahl der Wagen

Mit der Anzahl der Wagen wird direkt die Länge eines Zuges beeinflusst. Es wurden drei Maßnahmenarten identifiziert:

- minimale Länge des Zuges
- abgestimmte Länge des Zuges
- Bündelung von halblangen Zügen zu einem Zug

Bei der Anpassung der Zuglänge muss stets die konkrete Strecke und deren Infrastruktureinrichtungen beachtet werden. Zum einen sollte eine abgestimmte Zuglänge im Hinblick auf die fahrdynamischen Eigenschaften der Fahrzeuge und der Infrastruktureinrichtungen der Strecke möglichst komplett ausgenutzt werden. Damit wird sichergestellt, dass keine Kapazitäten der Infrastruktureinrichtungen (z. B. Ausnutzung der Länge von Überholgleisen) „verschenkt“ werden. Zum anderen kann auch der

Ansatz gewählt werden, dass die Züge verkürzt werden oder eine minimale Länge festgelegt wird, um die Dauer der Schalleinwirkung je Zug zu verkürzen und so die Streuungen der Zuglängen zu minimieren. Inwiefern ein kürzerer Zug positivere Auswirkungen auf die Emission im Vergleich zu einem längeren Zug besitzt, ist entsprechend zu überprüfen. In jedem Fall müssen die Lärmwirkung und in diesem Zusammenhang die Veränderung des Maximalpegels mit beachtet werden (UBA 2010b).

Mit der Bündelung von halblangen Zügen zu einem Zug wird die Anzahl der Zugfahrten reduziert. Hierbei ist zu beachten, dass die minimale bzw. abgestimmte Länge eingehalten wird.

Position

Die Reihung der Wagen erfolgt heute im Einzelwagenverkehr im Hinblick auf deren verkehrliches Ziel und sieht dabei keine Schallreduktion vor. Eine Reduktion kann aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften der Wagen erreicht werden. So könnten Wagen mit gleichem Ziel und gleichem Schallniveau zusammen gereiht werden. Die Art der Wagen und das verwendete Bremssystem fließen in die Berechnung des Schalleistungspegels nach Schall 03 ein und stellen somit ebenfalls Möglichkeiten zur Schallreduktion dar. Die Masse der Wagen wirkt sich auf die fahrdynamischen Eigenschaften des Zuges und somit auf das Beschleunigungs- und Bremsverhalten aus. Mögliche Eigenschaften sind daher:

- verkehrliches Ziel einzelner Wagen/Wagengruppen (s. o.)
- Masse der Wagen
- Art der Wagen
- Bremssystem der Wagen

Somit muss ein wirtschaftliches Optimum hinsichtlich des Laufwegs der Wagen und der Erreichung einer möglichst hohen Schallreduktion identifiziert werden. So könnte es z. B. für das Beschleunigen sinnvoller sein, schwerere Wagen direkt hinter dem Triebfahrzeug anzuordnen und so die Zugkraft zu reduzieren und damit eine Schallreduktion zu erreichen (Masse der Wagen). Ebenfalls könnte es zweckmäßiger sein, besonders laute Wagen direkt hinter einem lauten Triebfahrzeug anzuordnen und danach leisere Wagen folgen zu lassen (Art der Wagen). Durch die Bündelung der Wagen mit gleichem Bremssystem könnte auch eine Schallreduktion (s. o.) erreicht werden.

Aus den o. g. Eigenschaften wurden die Wagenarten und die Bremsarten zur Bündelung ausgewählt.

7.5 Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg

Nachdem Maßnahmenarten beschrieben wurden, die sich auf die Eigenschaften eines Zuges beziehen, folgen nun Maßnahmenarten, die eine Änderung der Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg bewirken. Dies kann entweder über eine *Fahrzeitveränderung* oder ein *Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume* erfolgen. Auch hier sind die jeweiligen Maßnahmenarten auf einen Zug bezogen. Sollen die Maßnahmenarten bei mehreren Zügen eingesetzt werden, so muss jeder einzelne Zug die entsprechende Maßnahme zugewiesen bekommen.

7.5.1 Fahrzeitveränderung

Die Fahrzustände einer Zugfahrt lassen sich in 4 Abschnitte (siehe Abbildung 7-1) unterteilen: Beschleunigen, Beharren, Auslaufen und Bremsen. In jedem dieser Abschnitte können Maßnahmenarten eingesetzt werden, die zu einer Schallreduktion und gleichzeitig zu einer Fahrzeitveränderung führen.

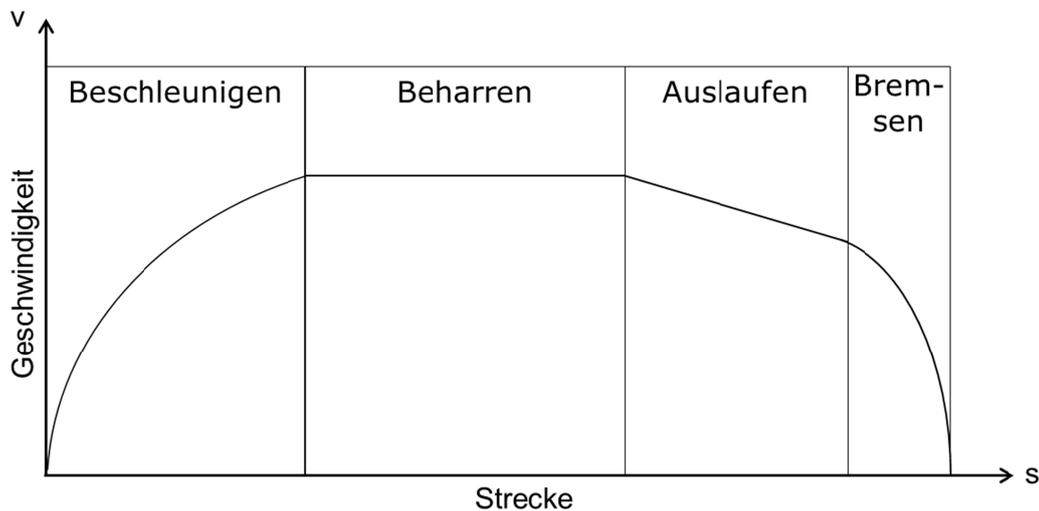


Abbildung 7-1: Fahrzustände einer Zugfahrt (nach Pachtl 2016)

Die Fahrzeitveränderung ergibt sich aus der Variation der Geschwindigkeit (Beharren), der Beschleunigung (Beschleunigen und Bremsen) oder dem Auslaufen eines Zuges. Die Geschwindigkeit kann entweder erhöht oder verringert werden. Bei der Beschleunigung wird aufgrund des Ziels der Reduktion der Schallemissionen nur eine Verringerung untersucht. Somit werden die Maßnahmenarten „höhere Beschleunigung“ und „höhere Höchstgeschwindigkeit“ nicht weiter betrachtet. Es ist jeweils zu prüfen, welche Variation der Geschwindigkeit bzw. der Beschleunigung vorgenommen wird. Dabei sind die Streckenhöchstgeschwindigkeit und die Höchstgeschwindigkeiten des Triebfahrzeuges und der Wagen zu beachten. Bezüglich des Auslaufens ist die Länge des Abschnitts, in dem das Auslaufen angewendet wird, festzulegen. Je länger der Abschnitt ist, desto größer ist der Einfluss auf die Fahrzeitveränderung.

Die Maßnahmenarten zur Fahrzeitveränderung sind unabhängig von den anderen Oberthemen der Maßnahmenarten. Daher ist eine Kombination mit diesen möglich. Des Weiteren ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten je Maßnahmenart, da die Dimensionen (siehe Kapitel 5.5) vielfältig variiert werden können. So kann z. B. der Zeitraum der Änderung festgelegt werden, der Ort, für den die Maßnahmenart gilt, angepasst werden und die Fahrzeugart, die von der Veränderung betroffen ist, definiert werden.

Im Folgenden werden den oben erwähnten Fahrzuständen (Beschleunigen, Beharren, Auslaufen und Bremsen) die jeweiligen Maßnahmenarten zugeordnet.

Beschleunigen

Für das Beschleunigen eines Zuges wurden drei Maßnahmenarten identifiziert:

- geringere Beschleunigung
- geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})
- Harmonisierung der Beschleunigungsphasen

Bei der 1. Maßnahmenart wird die Beschleunigung verringert und die Zielgeschwindigkeit bleibt erhalten. Dies wird mit einer geringeren Anfahrzugkraft erreicht. Dadurch wird die Strecke und die Dauer der Beschleunigungsphase verlängert, gleichzeitig wird damit eine Schallreduktion erreicht. Die geringere Beschleunigung kann für einen bestimmten Abschnitt einer Strecke (z. B. in einer Ortslage) gelten. Die Maßnahmenart kann sowohl bei einem anfahrenden Zug, als auch bei einem fahrenden Zug eingesetzt werden. Für den optimalen Einsatzpunkt der Beschleunigung muss der Triebfahrzeugführer detaillierte Informationen erhalten, wann und wie stark beschleunigt werden soll.

Zur Anzeige der Informationen sind entweder digitale Hinweise im Fahrzeug oder analoge mittels Signalen oder Schildern an der Strecke (z. B. Nutzung von bestehenden Infrastruktureinrichtungen) denkbar.

Mit einer Verringerung der Höchstgeschwindigkeit kann eine Verkürzung der Dauer der Beschleunigungsphase erreicht werden. Dadurch erreicht der Zug früher die Zielgeschwindigkeit und Schallemissionen werden vermieden. Demgegenüber stehen eine längere Belegung des Streckenabschnitts und eine Erhöhung der Dauer der Einwirkung, da die Höchstgeschwindigkeit reduziert wird.

Sowohl die geringere Beschleunigung als auch die geringere Höchstgeschwindigkeit können dazu führen, dass die Leistungsfähigkeit der Strecke sinkt.

Die bisherigen Maßnahmenarten des Beschleunigens bezogen sich jeweils auf einen einzigen Zug. Soll die Beschleunigung bei mehreren Zügen gleichzeitig verändert werden, so muss eine Harmonisierung stattfinden. Dies wird mit der letztgenannten Maßnahmenart erreicht.

Sowohl die Harmonisierung als auch die anderen Maßnahmenarten sollten nur dann durchgeführt werden, wenn es der Betriebsablauf zulässt und damit eine Schallreduktion erreicht werden kann. Es ist zulässig, wenn die Planmäßigkeit der anderen Züge (Verspätungen ≤ 1 Minute) gewährleistet ist und keine nennenswerten Einschränkungen (z. B. Baustellen oder Großstörungen) vorliegen.

Die Maßnahmenarten zum *Beschleunigen* können in Kombination mit den Maßnahmenarten *Auslaufen* und *Bremsen* eingesetzt werden.

Eine höhere Beschleunigung wird aufgrund der damit verbundenen Erhöhung der Schallemissionen im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet.

Beharren

Für die Beharrungsphase wurden ebenfalls drei Maßnahmenarten identifiziert:

- Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen
- geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})
- Harmonisierung der Beharrungsphasen

In der Regel wird ein Zug auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit beschleunigt und hält diese über einen längeren Zeitraum. Wenn die Höchstgeschwindigkeit ausgenutzt wird, werden zum einen die Dauer der Einwirkung reduziert und zum anderen die Anzahl der verschiedenen Geschwindigkeiten und damit die Beschleunigungs- und Bremsphasen reduziert. Gegenüber einer geringeren Höchstgeschwindigkeit (s. u.) ergeben sich höhere Schallemissionen.

Die Schallemissionen während der Beharrungsphase können reduziert werden, wenn eine geringere Höchstgeschwindigkeit gefahren wird (siehe *Beschleunigen*). Die zu fahrende Geschwindigkeit kann im Fahrzeug angezeigt (z. B. „Geschwindigkeit halten“) oder auf anderen Wegen (z. B. Zugfunk) kommuniziert werden. Dadurch werden zum einen die Emissionen reduziert, da mit einer geringeren Leistung gefahren wird, und zum anderen wird der Energieverbrauch gesenkt. Demgegenüber erhöht sich die Dauer der Einwirkung, da die Höchstgeschwindigkeit reduziert wird.

Die Beharrungsphase kann ebenfalls für mehrere Züge gleichzeitig verändert werden. Dies wird mit einer Harmonisierung der Phasen erreicht. Sie sollte nur dann durchgeführt werden, wenn dies der Betriebsablauf (s. o.) zulässt und damit eine Schallreduktion erreicht werden kann.

Auslaufen

Für das Auslaufen wurden zwei Maßnahmenarten identifiziert:

- Auslaufen nutzen
- Harmonisierung der Auslaufphasen

Ein Zug rollt ohne Einsatz des Motors z. B. durch eine Ortslage hindurch. Dies verhindert zum einen, dass die Emission des Motors innerhalb der Ortslage generiert wird, zum anderen rollt der Zug mit einer abnehmenden und damit geringeren Geschwindigkeit durch die Ortslage. Dies trägt ebenfalls zu einer Schallreduktion bei. Des Weiteren wird dadurch der Energieverbrauch gesenkt. Für den optimalen Einsatzpunkt des Auslaufens muss der Triebfahrzeugführer detaillierte Informationen darüber erhalten, wann ausgerollt werden soll.

Es können ebenfalls die Auslaufphasen bei mehreren Zügen gleichzeitig angewendet werden. Die Harmonisierung der Phasen sollte nur dann durchgeführt werden, wenn es der Betriebsablauf (s. o.) zulässt.

Die Maßnahmenarten zum *Auslaufen* können in Kombination mit den Maßnahmenarten *Beschleunigen* und *Bremsen* eingesetzt werden.

Bremsen

Für das Bremsen wurden zwei Maßnahmenarten identifiziert:

- geringere Beschleunigung
- Harmonisierung der Bremsphasen

Bei der 1. Maßnahmenart wird die Beschleunigung verringert und die Zielgeschwindigkeit bleibt erhalten. Dies wird mit einer geringeren Bremskraft erreicht. Dadurch wird die Strecke und die Dauer der Bremsphase verlängert, gleichzeitig wird damit eine Schallreduktion erreicht. Die geringere Beschleunigung kann für einen bestimmten Abschnitt einer Strecke (z. B. in einer Ortslage) gelten.

Damit wird eine Reduktion der Emission erreicht und diese in Gebiete außerhalb der Ortslage verschoben. Bei Einsatz der Maßnahmenart spielt es eine Rolle, aus welcher Geschwindigkeit der Zug bremst, da mit zunehmender Geschwindigkeit andere Schallquellen dominanter werden (siehe Abbildung 3-2). Für den optimalen Einsatzpunkt der Bremsung muss der Triebfahrzeugführer detaillierte Informationen erhalten, wann und wie stark gebremst werden soll. Zur Anzeige der Informationen sind entweder digitale Hinweise im Fahrzeug oder analoge mittels Signalen oder Schildern an der Strecke (z. B. Nutzung von bestehenden Infrastruktureinrichtungen) denkbar.

Die zweite Maßnahmenart zum Bremsen betrifft mehrere Züge. Deren Bremsphasen sollte nur dann harmonisiert werden, wenn der Betriebsablauf es zulässt und darüber eine Schallreduktion erreicht werden kann.

Die Maßnahmenarten zum *Bremsen* können in Kombination mit den Maßnahmenarten *Beschleunigen* und *Auslaufen* eingesetzt werden.

Eine höhere Beschleunigung wird aufgrund der damit verbundenen Erhöhung der Schallemissionen im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet.

Harmonisierung der Halte

Da bisher bei allen Fahrzuständen einer Zugfahrt (s. o.) eine Harmonisierung von mehreren Zügen vorgesehen ist, ist es sinnvoll, diese auch bei den Halten vorzusehen. Die Halte können zur Synchronisation der Züge genutzt werden, da nicht gewährleistet werden kann, dass die Harmonisierung bei allen Zügen exakt parallel abläuft (unterschiedliche Baureihen, verschiedene Triebfahrzeugführer, verschiedene Massen der Züge, etc.). Eine Harmonisierung der Halte würde diesen Sachverhalt beheben.

Geschwindigkeitsprofil

Für das Geschwindigkeitsprofil wurden zwei Maßnahmenarten identifiziert:

- schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)
- Weiterentwicklung der Zuglaufregelung

Ein schallarmes Geschwindigkeitsprofil kann mit Hilfe des Verzeichnisses der örtlich zugelassenen Geschwindigkeiten (VzG) auf einer Strecke konstruiert werden. Hier ist eine Erhöhung, Verringerung oder eine Kombination (z. B. Mittelwertbildung) für die verschiedenen Geschwindigkeiten denkbar. Damit werden mehrere Fahrzustände einer Zugfahrt gemeinsam betrachtet und so eine größere Strecke abgedeckt. Das Ziel ist es, die Anzahl der Geschwindigkeitsspitzen zu verringern und darüber eine Reduktion der Schallemissionen zu erreichen. Welche Verzeichnisse angepasst werden und wie hoch die Deltas zu den Ausgangsgeschwindigkeiten sind, ist entsprechend festzulegen. Eine so optimierte Abfolge ermöglicht einen flüssigeren und damit schallärmeren Betriebsablauf.

Die Geschwindigkeiten mehrerer Züge können auch insgesamt harmonisiert werden. Dabei kann ebenso eine Erhöhung, Verringerung oder eine Kombination (z. B. Mittelwert) gewählt werden. Damit können z. B. die Anzahl von Beschleunigungs- und Bremsphasen aufgrund langsamerer oder schnellerer Züge minimiert werden. Dies wirkt sich außerdem positiv auf den Energieverbrauch aus. Es werden also die Anteile *Beharren* und *Auslaufen* einer Zugfahrt erhöht. Für welchen Ort diese Harmonisierung gilt und welche Deltas zu den Ausgangsgeschwindigkeiten erreicht werden sollen, ist

für den jeweiligen Streckenabschnitt festzulegen. Die Harmonisierung wirkt sich auf die Mindestzugfolgezeiten zwischen den einzelnen Zügen aus, welche wiederum die Leistungsfähigkeit der Streckenabschnitte beeinflusst. Folgende Geschwindigkeitsszenarien sind für einen bestimmten Streckenabschnitt denkbar:

- Verringerung der Geschwindigkeit von schnellen Zügen
- Erhöhung der Geschwindigkeit von langsamen Zügen
- Bildung eines Mittelwerts, der sowohl eine Erhöhung als auch eine Verringerung der Geschwindigkeiten berücksichtigt

Neben der Harmonisierung der Geschwindigkeiten können auch die Verkehre selbst homogenisiert werden. Dazu wird auf einem bestimmten Streckenabschnitt die Zugreihenfolge geändert. Aus der Zugreihenfolge „schnell – langsam – schnell“ ließen sich beispielsweise folgende zwei Kombinationen bilden:

- schnell – schnell – langsam
- langsam – schnell – schnell

Damit werden zum einen die Brems- und Beschleunigungsphasen reduziert und zum anderen die Leistungsfähigkeit des Streckenabschnitts erhöht. Die Homogenisierung kann dabei in Verbindung mit der Harmonisierung angewendet werden. Denkbar wäre auch, dass schon bei der Trassenplanung (Ril 402 „Trassenmanagement“) bestimmte Zugreihenfolgen priorisiert oder im Rahmen von Systemtrassen angeboten werden.

Im Rahmen des schallarmen Geschwindigkeitsprofils sollen möglichst viele Halte, soweit betrieblich möglich, verhindert werden. Dies würde wiederum zu einer Verringerung der Beschleunigungs- und Bremsphasen und damit zu einer Schallreduktion führen. Des Weiteren kann es unter Umständen zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit auf einzelnen Streckenabschnitten kommen. Eine Umsetzung der Maßnahmenart ist nur dort möglich, wo die Signale entsprechend angesteuert und gestellt werden können. Dies kann z. B. durch die örtlichen Fahrdienstleiter oder automatisch, durch vorhandene Technik, erfolgen.

Mit der zweiten Maßnahmenart soll der Status quo der Zuglaufregelung um ein Modul „Lärm“ erweitert werden. Die bisherige Zuglaufregelung und ihre Fahrempfehlungen werden allein auf der Grundlage des aktuellen Betriebsablaufs getroffen. Damit soll ein Optimum der Kapazität für einen bestimmten Abschnitt und eine Energiereduzierung erreicht werden (Kefer und Oetting 2008), (Oetting 2008), (Oetting und Welter 2014). Die Weiterentwicklung der Zuglaufregelung zielt darauf ab, auch die Reduktion des Schalls bei der Entscheidungsfindung mit einzubeziehen. Damit werden gleichzeitig eine Energieeinsparung und eine Schallreduktion erreicht. Welche Gewichtung die Reduzierung des Energieverbrauchs und die Schallreduktion jeweils besitzen, muss festgelegt werden.

7.5.2 Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume

Bei Einsatz der in Kapitel 7.5.1 genannten Maßnahmenarten wird eine Zugtrasse punktuell angepasst. Dies führt zu veränderten Durchfahrzeiten und zu einer Veränderung der Schallemissionen. Gemäß Abbildung 5-3 besteht auch die Möglichkeit, die komplette Zugtrasse zeitlich zu verschieben. Dies ist bereits im Rahmen der Trassenanmeldung zur Konfliktlösung vorgesehen. Dazu sehen die Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG zwei Möglichkeiten vor:

-
- Erstellung eines Trassenangebots unter Nutzung der Konstruktionsspielräume ohne Rücksprache mit dem Antragsteller
 - Schienenpersonenverkehr: +/- 3 Minuten
 - Übrige Zugtrassen (z. B. Güterzüge, Triebfahrzeugfahrten): +/- 30 Minuten
 - Erstellung eines Trassenangebots unter Erweiterung der o. g. Konstruktionsspielräume in Rücksprache mit dem Antragsteller (sogenanntes Koordinierungsverfahren) (DB Netz AG 2017a)

Diese Möglichkeiten könnten auch zur Reduktion von Schallemissionen angewendet werden. Bei der Konstruktion der (neuen) Trasse sollte darauf geachtet werden, dass Güterzüge möglichst ohne Überholung konstruiert werden, um die Anzahl der Beschleunigungs- und Bremsphasen zu verringern. Auf diese neu konstruierte Trasse lassen sich ebenso die Maßnahmenarten zur Fahrzeitveränderung (siehe Kapitel 7.5.1) anwenden.

Inwiefern durch das zeitliche Verschieben einer Trasse eine Schallreduktion erreicht werden kann, ist für den konkreten Anwendungsfall zu prüfen. So könnten z. B. laute Güterzüge aus dem Beurteilungszeitraum Nacht in den Beurteilungszeitraum Tag (siehe Kapitel 5.5.3) verschoben werden. Im Beurteilungszeitraum Tag gelten höhere Grenzwerte, die durch den Güterzug leichter eingehalten werden können. Im Beurteilungszeitraum Nacht wird eine Schallreduktion erreicht, sofern entweder kein anderer Zug statt des Güterzuges fährt oder ein leiserer Zug die Trasse des Güterzuges übernimmt.

7.6 Änderung des Laufwegs

Neben den oben erwähnten Änderungen der Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg kann auch durch eine Änderung des Laufwegs eines Zuges eine Schallreduktion erreicht werden. Die Änderung ist in die Unterthemen *Umleitung unter erleichterten Bedingungen* und *Umleitung* unterteilt. Da für beide Unterthemen dieselben Maßnahmenarten erarbeitet wurden, werden diese gemeinsam beschrieben.

Es ist zwischen der Entlastung und der neuen Belastung durch den verlagerten Verkehr abzuwägen. Folgende Abwägungsgrößen bieten sich dafür an:

- Anzahl der entlasteten Personen
- Anzahl der neu belasteten Personen
- Höhe der Entlastung
- Höhe der Belastung
- Eignung der Alternativroute(n)
 - Fahrzeit
 - Streckenkategorie
 - Oberleitung ja/nein

Die Unterthemen *Umleitung unter erleichterten Bedingungen* bzw. *Umleitung* untergliedern sich in folgende Maßnahmenarten, die im Anschluss kurz erläutert werden:

- Parallelfahrten zulassen
- „Schallregion“ + „Ruheregion“
- Bauarbeiten, Betriebsstörungen oder Schallemissionen berücksichtigen

Parallelfahrten zulassen

Eine Parallelfahrt von zwei Zügen soll die Emissionen von Zügen bündeln. Eine Strecke, die mit entsprechender Signalisierung zum Befahren des Gegengleises ausgestattet ist, kann z. B. für jeweils vier Stunden zunächst in nördlicher und dann südlicher Richtung befahren werden. Das Betriebsprogramm muss entsprechend geplant und angepasst werden. Somit wird die Anzahl der Schallereignisse reduziert.

Umfahren von Lärmhotspots

Bei der Umfahrung von Lärmhotspots (Orte mit besonders hohem Schallpegel) wird der Verkehr bewusst an bestimmten Regionen vorbeigeleitet. Somit entstehen zum einen „Ruheregionen“ und zum anderen „Schallregionen“. In den jeweiligen Regionen herrscht entweder wenig Verkehr und damit ein geringer Schallpegel oder viel Verkehr und damit ein hoher Schallpegel. Damit soll bewusst für bestimmte Regionen das Schallniveau gesenkt bzw. gehoben werden. Die Kriterien zur Festlegung dieser Regionen können z. B. sein:

- Anzahl der entlasteten Personen
- Anzahl der neu belasteten Personen
- bestehendes Schallniveau
- Höhe der Entlastung
- Höhe der Belastung

Bauarbeiten, Betriebsstörungen oder Schallemissionen berücksichtigen

Im Rahmen der bisherigen Baubetriebsplanung wird u. a. die Integrierte Bündelung für Baustellen angewendet. Damit werden verschiedene Baustellen auf einem Streckenabschnitt so aufeinander abgestimmt, dass der Zugverkehr auf dem Abschnitt möglichst wenig beeinträchtigt wird. Da Baustellen unter anderem Schallemissionen erzeugen und diese oftmals störender wirken als Zugfahrten, ist eine Kombination von Baustellen und Zugfahrten durchaus sinnvoll. Inwieweit ein gleichzeitiges Fahren und Bauen vereinbar ist, muss von Strecke zu Strecke geprüft werden.

7.7 (Teil-)Ausfall

Neben der Fahrzeitveränderung eines Zuges, dem zeitlichen Verschieben oder der Änderung des Laufwegs besteht auch die Möglichkeit, einen Zug teilweise oder komplett ausfallen zu lassen und darüber eine Schallreduktion zu erreichen. Die zugehörigen Unterthemen werden dementsprechend bezeichnet: *Teilausfall* und *Ausfall*. Da für beide Unterthemen dieselben Maßnahmenarten erarbeitet wurden, werden diese gemeinsam beschrieben.

Die Unterthemen *Teilausfall* bzw. *Ausfall* untergliedern sich in folgende Maßnahmenarten, die im Anschluss kurz erläutert werden:

- Leerfahrten vermeiden
- Züge abschnittsweise kuppeln

Leerfahrten vermeiden

Bisher wird die Transportkapazität der Züge nicht überall ausgelastet. Dies liegt zum einen daran, dass die zur Verfügung stehende Zuglänge nicht komplett ausgenutzt wird (siehe Kapitel 7.4.2) und zum anderen daran, dass in einem Zug Leerwagen verkehren (Siegmann und Stuhr 2012). Durch eine Vermeidung von Leerfahrten können Schallemissionen und Energieverbräuche reduziert werden, da weniger Wagen in einem Zug verkehren.

Wenn die Leerfahrten vermieden werden können, können die freigewordenen Kapazitäten durch beladene Wagen genutzt werden. Dadurch würde sich die Auslastung der Züge erhöhen. In einem nächsten Schritt könnten so aus 3 Zügen 2 gebildet werden und dadurch die Anzahl der Zugfahrten reduziert werden, was ebenfalls zu einer Schallreduktion beiträgt.

Die geringere Zugzahl kann z. B. für Pausen in der Nacht genutzt werden. Ebenfalls ist eine Kombination mit weiteren Maßnahmenarten (s. o.) und die Verbindung mit den genannten Dimensionen sinnvoll. Nicht zu vernachlässigen ist der relativ hohe planerische Aufwand für die Zugzusammenstellung. Inwieweit ein EIU auf ein EVU einwirken kann, um Leerfahrten zu vermeiden, ist bisher nicht geklärt.

Züge abschnittsweise kuppeln

Eine weitere Maßnahmenart zur Reduktion der Schallemissionen bei gleichzeitiger Erhöhung des Auslastungsgrades ist die abschnittsweise Kupplung von Zügen. Oftmals wird die maximal mögliche Zuglänge auf einer Strecke nicht ausgenutzt (siehe Kapitel 7.4.2). Eine abschnittsweise Kupplung von z. B. zwei kurzen Zügen eines EVU zu einem langen, könnte dies beheben. Dadurch würden weniger Zugfahrten stattfinden und so eine Reduktion der Schallemissionen erreicht werden. Ebenfalls könnten Kapazitäten in der Trassenvergabe entstehen, die z. B. für Pausen in der Nacht genutzt werden können. Des Weiteren ist eine Kombination mit weiteren Maßnahmenarten (s. o.) und die Verbindung mit den genannten Dimensionen sinnvoll. Zu bedenken ist jedoch der zeitliche Aufwand für das Kuppeln der Züge.

7.8 Zusammenfassung

Mit dem in diesem Kapitel dargestellten Steckbrief lassen sich die jeweiligen Maßnahmenarten einheitlich beschreiben. Zusammen mit dem Schema der Grobbewertung (siehe Kapitel 6) und der durchgeführten Grobbewertung (im folgenden Kapitel) ist eine Vergleichbarkeit der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten möglich.

8 Grobbewertung der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten

8.1 Einleitung

Nachdem in Kapitel 6 das Schema für die Grobbewertung entwickelt und in Kapitel 7 die zu bewertenden Maßnahmenarten beschrieben wurden, wird in diesem Kapitel die Bewertung der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten durchgeführt. Daraus ergeben sich danach eine Gruppe von Maßnahmenarten, die weiter ausgearbeitet und behandelt werden und eine zweite Gruppe Maßnahmenarten, die im Rahmen der Arbeit nicht weiter untersucht werden. Das Kriterium hierfür ist die Vergabe einer positiven Bewertung. Somit erfolgt eine Reduzierung der Anzahl der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten, welche weiter untersucht werden.

8.2 Methode

Jede Maßnahmenart wird mit Hilfe der in Kapitel 6.2 genannten Kriterien bewertet. Anschließend wird über diese das Bewertungsergebnis je Maßnahmenart gebildet.

Im ersten Schritt werden die Einzelergebnisse der wichtigen Kriterien *Nutzen* und *Kosten* im Kriterium *Nutzen-Kosten-Verhältnis* zusammengefasst. Erhält eine Maßnahmenart bei diesem Kriterium eine negative Bewertung, ist eine weitere Untersuchung ausgeschlossen, da entweder kein Nutzen, hohe Kosten oder beides erwartet wird. Somit dient das *Nutzen-Kosten-Verhältnis* als Ausschlusskriterium.

Wie bereits erwähnt, zählen die Kriterien *Nutzen* und *Kosten* zu den wichtigen Kriterien. Deren Einzelergebnisse werden im zweiten Schritt betrachtet. Durch die Anwendung einer Maßnahmenart ergeben sich in der Planung und dem Betrieb Änderungen. Mit dem Kriterium *betriebliche Wirkung* wird die Änderung bewertet.

Im letzten Schritt wird das Zwischenergebnis der Kriterien *Nutzen*, *Kosten* und *betriebliche Wirkung* mit der Bewertung der Kriterien *Nutzen-Kosten-Verhältnis* und *Umsetzbarkeit* zu einem Ergebnis zusammengefasst. Aufgrund der Schwierigkeit, das Kriterium *Umsetzbarkeit* im Rahmen der Grobbewertung abzuschätzen, wird dies erst im letzten Schritt getan.

Die Bildung des Ergebnisses erfolgt somit in den folgenden drei Schritten:

1. Ist das Kriterium *Nutzen-Kosten-Verhältnis* mit „-“ bewertet, wird das Bewertungsergebnis „-“, unabhängig von der Bewertung der übrigen Kriterien.
2. Vorgehen für Kriterien *Nutzen*, *Kosten* und *betriebliche Wirkung*
 - a. Die positiven („+“) und negativen („-“) Bewertungen werden zu einer neutralen Bewertung („o“) „verrechnet“. Anschließend liegen einfache Mehrheiten vor:
 - b. Mehrheiten
 - i. Liegt eine Mehrheit von „+“ vor, wird Ergebnis „+“.
 - ii. Liegt eine Mehrheit von „-“ vor, wird Ergebnis „-“.
 - iii. Sind zwei Kriterien mit „o“ bewertet, wird das Ergebnis anhand des 3. Kriteriums bestimmt.
 - iv. Sind alle Kriterien mit „o“ bewertet, wird Ergebnis „o“.
3. Einbeziehung der Kriterien *Nutzen-Kosten-Verhältnis* und *Umsetzbarkeit*
 - a. Die positiven („+“) und negativen („-“) Bewertungen werden zu einer neutralen Bewertung („o“) „verrechnet“. Anschließend liegen Mehrheiten vor.
 - b. Mehrheiten (s. o.)
 - c. Sind zwei Kriterien mit „o“ und *Umsetzbarkeit* mit „-“ bewertet, wird das Ergebnis „o“.

Das Bewertungsergebnis je Maßnahmenart kann nun einen positiven („+“), neutralen („o“) oder negativen („-“) Wert annehmen. Die Maßnahmenarten mit einem positiven Ergebnis werden im Rahmen der Arbeit weiter untersucht, da die Realisierbarkeit und Eignung (siehe Kapitel 6.2) durch die Grobbewertung gezeigt werden konnte. Dies ist bei Maßnahmenarten mit einem neutralen oder negativen Ergebnis nicht der Fall. Daher werden diese verworfen und nicht weiter untersucht.

Zur Grobbewertung ist zu erwähnen, dass neben einer neutralen oder negativen Bewertung nur noch das Nutzen-Kosten-Verhältnis eine weitere Untersuchung einer Maßnahmenart verhindern kann. Ferner existieren keine weiteren Ausschlusskriterien.

Die Bewertungsergebnisse der einzelnen Maßnahmenarten sind in Anlage 10 dargestellt.

8.3 Ergebnisse

Nachdem die Grobbewertung und die Bewertungsergebnisse je Maßnahmenart gebildet wurden, ergeben sich folgende Anzahlen der Bewertungen:

- positive Bewertung: 10 Maßnahmenarten
- neutrale Bewertung: 15 Maßnahmenarten
- negative Bewertung: 7 Maßnahmenarten

Somit reduziert sich die Anzahl der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten auf die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten von 32 auf 10, da die neutral und negativ bewerteten Maßnahmenarten ausgeschlossen werden (s. o.).

In Tabelle 8-1 sind die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten dargestellt.

Tabelle 8-1: Übersicht über die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten

Oberpunkt	Unterpunkt	Maßnahmenart	Nr.
Änderung des Wagenzuges	Art der Wagen	nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen	1
Fahrzeit- veränderung	Beschleunigen	geringere Beschleunigung	2
		geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})	3
		Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) ausnutzen	4
	Beharren	geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})	5
		Auslaufen	Auslaufen nutzen
	Bremsen	geringere Beschleunigung	7
	Geschwindigkeitsprofil	schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)	8
		Weiterentwicklung der Zuglaufregelung	9
	Umleitung		Umfahren von Lärmhotspots

8.4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Grobbewertung wurde eine erste Einschätzung hinsichtlich der Realisierbarkeit und Eignung der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten getroffen. Aufgrund dieser Einschätzung konnte die Anzahl der Maßnahmenarten im Hinblick auf die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten deutlich reduziert werden. Dabei ist auffällig, dass vor allem die Maßnahmenarten im Hinblick auf Fahrzeitveränderungen positiv bewertet wurden. Die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten werden mit Hilfe des in Kapitel 9 dargestellten Schemas zur detaillierten Bewertung in Kapitel 11 bewertet. In Kapitel 10 werden die Maßnahmenarten ausführlich beschrieben.



9 Entwicklung eines Schemas zur detaillierten Bewertung

9.1 Einleitung

Nachdem in Kapitel 7 die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten vorgestellt und diese in Kapitel 8 grob bewertet wurden, wird nun das Schema zur detaillierten Bewertung der attraktiveren bzw. weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten vorgestellt. Zur Sicherstellung der Konsistenz werden die beschriebenen Kriterien der Grobbewertung aus Kapitel 6 als Grundlage für eine Detaillierung und Feinbewertung einer Maßnahmenart und deren Maßnahmen zur Schallreduktion genutzt.

Für eine einheitliche Bewertung einer Maßnahmenart ist die Zusammenfassung der Bewertungskriterien erforderlich. Dies erfolgt aufgrund des hohen Einflusses (siehe Kapitel 8) monetärer Kriterien für die Gesamtbewertung mit einer monetären Größe. Dafür müssen zunächst für die einzelnen Kriterien die Auswirkungen einer Maßnahme quantifizieren werden können. Die Darstellung der Formeln mit Einflussgrößen und Parametern ist das Ziel dieses Kapitels. Für die Darstellung der Formeln wird auf bestehende Arbeiten (z. B. Dickenbrok (2012) oder Lienau (2006)) zurückgegriffen.

Mit dem Schema und der detaillierten Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten wird in Kapitel 11 für jede untersuchte Maßnahme ein Nutzen-Kosten-Verhältnis gebildet, um damit die Maßnahmenarten zu identifizieren, die eventuell zum Einsatz kommen könnten.

9.2 Kosten

9.2.1 Einleitung

Bisher wurde mit dem Kriterium *Kosten* eine grobe Einschätzung hinsichtlich der Kosten einer Maßnahmenart vorgenommen. Zur Bildung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses ist eine Berechnung der Kosten notwendig. Zur Unterstützung des Anwenders, werden die Berechnung nach EIU und EVU getrennt. Daher erfolgt in diesem Kapitel eine detaillierte Darstellung der Formeln zur Kostenberechnung im System Bahn (siehe Kapitel 3.10).

Bis auf die mittelbaren Erlösminderungen können alle Kosten aufgrund von vorliegenden Werten berechnet werden. Entweder liegen aufgrund langjähriger Erfahrungen konkrete Werte vor oder es kann mit einem erhebbaren Wert (z. B. €/kWh) gerechnet werden. Dies ist bei den mittelbaren Erlösminderungen nicht möglich. Hier liegen z. B. Fahrzeitbewertungsfaktoren vor, die nicht für einen einzelnen Zug gelten. Die Höhe der mittelbaren Erlösminderung kann über Modelle geschätzt werden.

Durch die Anwendung einer Maßnahme entstehen im System Bahn meist zusätzliche Kosten, die ohne die Anwendung nicht auftreten würden. Die zusätzlichen Kosten können hervorgerufen werden durch die Änderung der Höhe bereits vorhandener Kostenarten und das Auftreten neuer Kostenarten.

Wie bereits erwähnt werden Kostenarten, die keine Änderung aufgrund der Anwendung einer Maßnahme erfahren, nicht weiter berücksichtigt. Beim EIU werden daher grundsätzlich folgende Kostenarten nicht weiter betrachtet: Kapitalkosten, Verbrauchsstoffe, einmalige Kosten und Gemeinkosten. Folgende Kostenarten werden beim EVU grundsätzlich nicht weiter betrachtet: Verbrauchsstoffe, einmalige Kosten für Demontage und Entsorgung sowie Gemeinkosten des Unternehmens. Aufgrund der Vollständigkeit werden auch die Kostenarten, die nicht weiter betrachtet werden, im Folgenden beschrieben.

Welche Kostenarten auftreten und welche Höhe die Veränderung der Kosten aufweist, wird direkt durch die Anwendung einer bestimmten Maßnahme beeinflusst. Um die Berechnungen zur Kostenänderung durchzuführen, werden jeder Kostenart eine oder mehrere physikalische Größen zugeordnet. Oetting (2005) bezeichnet folgende Größen als „Grundgrößen“:

- Streckenlänge L_{Strecke}
- realisierte Beförderungszeit t_{Bef}
- Betrachtungszeitraum t_U
- Masse m_{Zug}

Da alle anderen Größen aus diesen abgeleitet werden können, bilden diese die Grundlage für die Ermittlung von Veränderungen bei Anwendung einer Maßnahme. Die Höhe der Veränderung geht in die Berechnung ein. Durch die Veränderung der Größen bei gegebenen Kostensätzen kann eine Kostenänderung der Kostenarten berechnet werden.

Dickenbrok (2012) stellt in seiner Dissertation die Kosten getrennt nach EIU und EVU dar. Da er das Verfahren der UIC nach den Merkblättern 714 und 715 in seiner Arbeit beschreibt, die dargestellten Formeln detailliert darstellt und eine Unterscheidung zwischen auslastungsabhängigen und auslastungsunabhängigen Kosten getroffen wird, wird für die Darstellung der Kosten vorwiegend auf Dickenbrok und seine Arbeit zurückgegriffen.

Zunächst werden die Kostenarten eines EIU (siehe Kapitel 9.2.2) und anschließend die Kostenarten eines EVU (siehe Kapitel 9.2.3) beschrieben.

9.2.2 Kostenarten eines EIU

Wie in Kapitel 3.10 beschrieben, wird in dieser Arbeit nach folgenden Kostenarten unterschieden:

- Kapitalkosten: Abschreibung und Verzinsung
- Instandhaltungskosten: Entstörung, Wartung, Inspektion und Instandsetzung
- Betriebskosten: Personal, Energie und Verbrauchsstoffe
- Einmalige Kosten: Rückbau und Entsorgung
- Gemeinkosten: Planung, Verwaltung, Unternehmensleitung, Steuern, Versicherungen und Vertrieb

Kapitalkosten

Die Kapitalkosten entstehen bei Investitionen in die Infrastruktur und werden durch Abschreibung und Verzinsung abgebildet. Nach Dickenbrok (2012) werden der Neu- und Ausbau von Strecken und Erneuerungsmaßnahmen am Bestandsnetz berücksichtigt. Des Weiteren können die Kapitalkosten in einen variablen und einen fixen Anteil unterteilt werden, wobei der fixe Anteil (unabhängig von den Zugzahlen) überwiegt (Oetting 2005). Da nach Sauer (1984) die Fahrwegkosten weitestgehend unabhängig vom Betrieb sind, kann der variable Anteil vernachlässigt werden. Dies wird auch von Jochim (1999) bestätigt, der von einem „konstanten Sockel der Infrastrukturkosten“ spricht. Im Rahmen der Arbeit werden daher keine variablen Kapitalkosten angesetzt. Der belastungsabhängige Infrastrukturverschleiß bei Anwendung einer Maßnahme wird mit den Instandhaltungskosten abgedeckt. Der fixe Anteil ist unabhängig von den Zugzahlen und den durchgeführten Maßnahmen konstant und wird ebenfalls nicht angesetzt.

Instandhaltungskosten

Die Infrastruktur ist durch die Zugfahrten einer mechanischen Belastung ausgesetzt. Diese führt zu einem Verschleiß am Oberbau und der Oberleitung. Eine regelmäßige Instandhaltung wirkt dem Verschleiß durch mechanische Belastung sowie durch Witterung entgegen. Die Kosten entstehen bei Entstörung, Wartung, Inspektion und Instandsetzung und werden im Rahmen der Arbeit als Instandhaltungskosten betrachtet. Auch diese Kosten lassen sich in einen variablen und einen fixen Anteil unterteilen, wobei der fixe Anteil (unabhängig von der Zugzahl) überwiegt (Oetting 2005). Der variable Anteil bildet den Einfluss der Belastung (z. B. Tonnenkilometer) aus dem Betrieb ab. Nach Deutsche Bundesbahn (1961) werden folgende Kostengruppen unterschieden:

- Oberbau
- Fahrleitung
- Anlagen für die elektrische Zugförderung (Stromversorgungseinrichtungen)
- Bahnanlagen

Die Belastung wirkt dabei auf den Oberbau (z. B. Schiene, Schwelle, Schotter, Weiche) und auf die Fahrleitung (= Oberleitung). Die Anlagen für die elektrische Zugförderung und die Bahnanlagen verschleissen belastungsunabhängig und werden daher im weiteren Verlauf nicht weiter berücksichtigt (Dickenbrok 2012).

Zur Berechnung der belastungsabhängigen Kosten stellt Dickenbrok (2012) eine Abhängigkeit zwischen Herstell- und Instandhaltungskosten nach Formel 9-1 her.

$$p_{IH,G} = \frac{\alpha_{IH,G} \cdot \frac{1a}{365d}}{K_{HS,G}} \quad 9-1$$

Dabei sind:

- $p_{IH,G}$ relativer Instandhaltungskostensatz des Oberbaus [1/d bzw. %/d]
- $\alpha_{IH,G}$ Instandhaltungskostensatz des Oberbaus [€/ (a•m)]
- $K_{HS,G}$ Herstellkostensatz des Oberbaus [€/m]

Die Herstellkostensätze liegen für das Jahr 1998 vor und werden auf das Bezugsjahr 2016 hochgerechnet. Dazu werden Formel 9-2 und Tabelle 9-1 verwendet. (Dickenbrok 2012)

$$K_t = K_0 \cdot \frac{p_{EPI,t}}{p_{EPI,0}} \quad 9-2$$

Dabei sind:

- K_t Kostensatz für das Bezugsjahr t [€/m]
- K_0 Kostensatz für das Erhebungsjahr der Datenquelle [€/m]
- $p_{EPI,t}$ Erzeugerpreisindex für das Bezugsjahr t [-]
- $p_{EPI,0}$ Erzeugerpreisindex für das Erhebungsjahr der Datenquelle [-]

Tabelle 9-1: Erzeugerpreisindex für die Komponenten des Oberbaus (Lienau 2006), (Statistisches Bundesamt 2017b)

Erzeugerpreisindex	Warmgewalzte Lang- erzeugnisse (= Schiene)	Vorgefertigte Bauelemente aus Beton (= Schwelle)	Kies (= Schotter)
1998	68,3	101,6	97,8
2016	83,5	113,6	113,6

Die Herstellkostensätze für das Jahr 1998 werden in Lienau (2006) genannt und sind in Tabelle 9-2 dargestellt.

Tabelle 9-2: Bestimmung des Herstellkostensatzes für das Jahr 2016 (Lienau 2006), (Statistisches Bundesamt 2017b)

Erzeugerpreisindex	HK 1998 = K_{1998} [€/m]	EP-Index 2016 = $p_{EPI,2016}$ EP-Index 1998 = $p_{EPI,1998}$	HK 2016 = K_{2016} [€/m]
Schiene	86,0	83,5/68,3	105,1
Schwelle	172,0	113,6/101,6	192,3
Schotter	86,0	113,6/97,8	99,9
Summe	344,0	-	≈ 397,0

Der Instandhaltungskostensatz des Oberbaus wird von Dickenbrok (2012) übernommen und beträgt 5,05 €/ (m•a). Der relative Instandhaltungskostensatz kann somit nach Formel 9-3 berechnet werden.

$$p_{IH,G} = \frac{\alpha_{IH,G}}{K_{HS,G}} = \frac{5,05 \frac{\text{€}}{(a \cdot m)} \cdot \frac{1a}{365d}}{397,0 \frac{\text{€}}{m}} = 0,00003 \frac{1}{d} = 0,003 \frac{\%}{d} \quad 9-3$$

Dabei sind:

- $p_{IH,G}$ relativer Instandhaltungskostensatz des Oberbaus [1/d bzw. %/d]
- $\alpha_{IH,G}$ Instandhaltungskostensatz des Oberbaus = 5,05 €/ (a•m)
- $K_{HS,G}$ Herstellkostensatz des Oberbaus = 397,0 €/m (s. o.)

Oberbau

Wie bereits oben erwähnt, werden in Deutsche Bundesbahn (1961) die verschiedenen Oberbaukomponenten nicht unterschieden. Eine separate Betrachtung der Weichen ist deshalb erforderlich, da diese „[...] einem wesentlich größeren Verschleiß unterliegen und einen wesentlich höheren Inspektions- und Wartungsaufwand erfordern“ (Lienau 2006). Somit wird im weiteren Verlauf zwischen Oberbau (z. B. Schiene, Schwelle, Schotter) und Weiche unterschieden. Diese Unterscheidung wird auch nach dem Verfahren der UIC-Merkblätter 714 und 715 (UIC 2009), (UIC 1992) getroffen. Die Berechnung der Instandhaltungskosten erfolgt daher nach den genannten Merkblättern. In diesen wird ein auslastungsabhängiges Verschleißverhalten des Oberbaus und der Weichen mit Hilfe von Kostenfaktoren beschrieben. Das Verfahren wird ebenfalls in Dickenbrok (2012) verwendet und für die Berechnungen zu Grunde gelegt.

Die UIC legt folgenden Referenzoberbau zu Grunde:

- Schienenprofil UIC60
- lückenlos verschweißtes Gleis
- Betonschwellen B70 im Abstand von 60 cm
- elastische Schienenbefestigung
- Schotterdicke 30 cm

Nach Dickenbrok (2012) sind die maßgebenden Kriterien zur Belastung des Oberbaus:

- die Geschwindigkeit und
- die Lasten der verkehrenden Züge.

Im Rahmen des UIC-Verfahrens werden diese beiden Kriterien in einer fiktiven Betriebsbelastung berücksichtigt. Der Basisfall ist so definiert, dass der Kostenfaktor den Wert 1,0 annimmt.

Die fiktive Betriebsbelastung nach UIC ist in Formel 9-4 dargestellt.

$$m_{fikt,i} = f_{v,i} \cdot (m_{Wg,i} + 1,4 \cdot m_{Tfz,i}) \quad 9-4$$

Dabei sind:

- $m_{fikt,i}$ fiktive Betriebsbelastung des Zuges i [t/d]
- $f_{v,i}$ Einflussfaktor der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit des Zuges i [-]
- $m_{Wg,i}$ Wagenzugmasse des Zuges i [t]
- $m_{Tfz,i}$ Triebfahrzeugmasse des Zuges i [t]

Mit dem Faktor 1,4 wird die höhere Belastung durch angetriebene Achsen berücksichtigt.

Die gesamte fiktive Betriebsbelastung ergibt sich nach Formel 9-5.

$$m_{fikt} = \sum_{i=1}^n m_{fikt,i} \quad 9-5$$

Dabei sind:

- m_{fikt} fiktive Betriebsbelastung aller Zugfahrten auf dem betrachteten Streckenabschnitt im Untersuchungszeitraum [t/d]
- $m_{fikt,i}$ fiktive Betriebsbelastung des Zuges i [t/d]
- n Anzahl der Zugfahrten auf dem betrachteten Streckenabschnitt im Untersuchungszeitraum [-]

Dickenbrok (2012) hat für den Faktor $f_{v,i}$ eine Regressionsanalyse durchgeführt und konnte daraus folgende lineare Funktion herleiten:

$$f_{v,i} = 0,002 \cdot v_{max,i} + 0,959 \quad 9-6$$

Dabei sind:

- $f_{v,i}$ Einflussfaktor der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit des Zuges i [-]
- $v_{max,i}$ Höchstgeschwindigkeit des Zuges i auf dem betrachteten Streckenabschnitt [km/h]

Mit der ermittelten fiktiven Betriebsbelastung kann der betrachtete Streckenabschnitt einer Belastungsgruppe zugeordnet werden. Dickenbrok (2012) leitet aus den Intervallgrenzen der Belastungsgrenzen eine Potenzfunktion her, um den Kostenfaktor in Abhängigkeit der fiktiven Betriebsbelastung berechnen zu können (siehe Formel 9-7).

$$f_{K,G} = 0,4 + 0,017 \cdot m_{fikt}^{0,34} \quad 9-7$$

Dabei sind:

- $f_{K,G}$ Kostenfaktor des Oberbaus [-]
- m_{fikt} fiktive Betriebsbelastung aller Zugfahrten auf dem betrachteten Streckenabschnitt im Untersuchungszeitraum [t/d]

Der Kostenfaktor wird nicht kleiner als 0,4. Dieser Anteil deckt die Kosten der äußeren Einflüsse durch Witterung und Vegetation auf den Oberbau ab (Dickenbrok 2012).

Die Änderung der Instandhaltungskosten des Oberbaus können nun in Abhängigkeit der fiktiven Betriebsbelastung ermittelt werden. Zunächst müssen die Belastung und die Kosten im Ausgangszustand (ohne Anwendung einer Maßnahme) berechnet werden. Nach Anwendung einer Maßnahme könnte sich die Betriebsbelastung ändern und mit ihr auch die Instandhaltungskosten des Oberbaus. Durch eine Differenzbildung kann dann die Änderung der Instandhaltungskosten ermittelt werden. Die Instandhaltungskosten können nach Formel 9-8 berechnet werden (Dickenbrok 2012).

$$K_{IH,G} = l_G \cdot K_{HS,G} \cdot p_{IH,G} \cdot f_{K,G} \quad 9-8$$

Dabei sind:

- $K_{IH,G}$ Instandhaltungskosten des Oberbaus im betrachteten Streckenabschnitt [€/d]
- l_G Gleislänge des betrachteten Streckenabschnitts [m]
- $K_{HS,G}$ Herstellkostensatz des Oberbaus [€/m]
- $p_{IH,G}$ relativer Instandhaltungskostensatz des Oberbaus [1/d]
- $f_{K,G}$ Kostenfaktor des Oberbaus [-]

Um die belastungsabhängigen Instandhaltungskosten von Weichen berechnen zu können, muss die geometrische Weichenlänge in eine äquivalente Gleislänge umgerechnet werden. Dies ist in Formel 9-9 dargestellt (Dickenbrok 2012).

$$l_{fikt,W} = f_{L,W} \cdot l_{geom,W}$$

9-9

Dabei sind:

- $l_{fikt,W}$ äquivalente Gleislänge einer Weiche [m]
- $f_{L,W}$ Längenfaktor der Weiche [-]
- $l_{geom,W}$ geometrische Weichenlänge [m]

Dickenbrok (2012) hat in Abhängigkeit der fiktiven Betriebsbelastung eine Formel für den Längenfaktor von Weichen hergeleitet (siehe Formel 9-10).

$$f_{L,W} = 4,4 + 0,0745 \cdot m_{fikt}^{0,4211}$$

9-10

Dabei sind:

- $f_{L,W}$ Längenfaktor der Weiche [-]
- m_{fikt} fiktive Betriebsbelastung aller Zugfahrten auf dem betrachteten Streckenabschnitt im Untersuchungszeitraum [t/d]

Nach Dickenbrok (2012) können die Kosten für die Unterhaltung der stellwerkstechnischen Einbindung und Energieversorgung der Weichen als fix angesehen werden. Daher werden sie im Rahmen der Arbeit nicht weiter untersucht.

Die Instandhaltungskosten von Weichen ergeben sich nach Formel 9-11 (Dickenbrok 2012).

$$K_{IH,W,j} = n_j \cdot l_{fikt,W,j} \cdot \alpha_{IH,G} \cdot f_{K,G}$$

9-11

Dabei sind:

- $K_{IH,W,j}$ Instandhaltungskosten aller Weichen der Bauform j im betrachteten Streckenabschnitt [€/d]
- n_j Anzahl der Weichen der Bauform j im betrachteten Streckenabschnitt [-]
- $l_{fikt,W,j}$ äquivalente Gleislänge einer Weiche der Bauform j im betrachteten Streckenabschnitts [m]
- $\alpha_{IH,G}$ Instandhaltungskostensatz des Oberbaus = 5,05 €/ (a•m)
- $f_{K,G}$ Kostenfaktor des Oberbaus [-]

Die Gesamtkosten aller Weichen im betrachteten Streckenabschnitt ergeben sich nach Formel 9-12.

$$K_{IH,W} = \sum_{j=1}^n K_{IH,W,j}$$

9-12

Dabei sind:

- $K_{IH,W}$ Instandhaltungskosten aller Weichen im betrachteten Streckenabschnitt [€/d]
- $K_{IH,W,j}$ Instandhaltungskosten aller Weichen der Bauform j im betrachteten Streckenabschnitt [€/d]
- n Anzahl der Weichen im betrachteten Streckenabschnitt [-]

Oberleitung

In Deutsche Bundesbahn (1961) wird nicht nur der Verschleiß des Fahrdrahtes mit in die Kostenberechnung einbezogen, sondern auch die belastungsunabhängigen jährlichen Unterhaltungskosten für die Fahrleitung. Die Unterhaltungskosten werden im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet und daher auch nicht berücksichtigt. Daher wird für die Berechnung wie in Lienau (2006) vorgegangen. Dort wird der variable Instandhaltungskostenanteil über die Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge berücksichtigt.

Der Verschleiß der Oberleitung hängt allein von der Anzahl der stattfindenden Zugfahrten ab. Nach ca. 1,25 Mio. Stromabnehmerdurchgängen muss ein Kupferfahrdrabt erneuert werden. Als Kostensatz werden 15.000 €/km angenommen. Mit der Annahme, dass ein Stromabnehmerdurchgang einer Zugfahrt entspricht, ergeben sich die in Formel 9-13 dargestellten Kosten. (Lienau 2006)

$$\alpha_{OL,Abn} = \frac{15.000 \frac{\text{€}}{\text{km}}}{1.250.000 \text{ Zugfahrten}} = 0,012 \frac{\text{€}}{(\text{km} \cdot \text{Zugfahrt})} \quad 9-13$$

Dabei ist:

- $\alpha_{OL,Abn}$ Kostensatz für Abnutzung des Fahrdrahtes [€/ (km • Zugfahrt)]

Lienau (2006) berücksichtigt zusätzlich die Streckentrennungen, die von den Durchgängen ebenfalls belastet werden, und gibt einen Kostensatz von 0,015 €/ (km • Zugfahrt) an.

Die Instandhaltungskosten für die Oberleitung ergeben sich nach Formel 9-14.

$$K_{IH,O} = \alpha_{OL,Abn} \cdot l_O \cdot n_{ZF} \quad 9-14$$

Dabei sind:

- $K_{IH,O}$ Instandhaltungskosten der Oberleitung [€/d]
- $\alpha_{OL,Abn}$ Kostensatz für Abnutzung des Fahrdrahtes [€/ (km • Zugfahrt)]
- l_O Länge der Oberleitung des betrachteten Streckenabschnitts [km]
- n_{ZF} Anzahl der Zugfahrten mit elektrischer Traktion pro Tag im betrachteten Streckenabschnitt [Zugfahrten/d]

Betriebskosten

Bei den Kosten des Betriebes wird zwischen Personal, Energie und Verbrauchsstoffen unterschieden.

Personalkosten

Die Personalkosten enthalten die Lohnkosten des Stellwerkspersonals sowie für andere örtliche Personale. Durch die Behandlung eines Zuges entsteht für diese Personale Aufwand. Durch die Anwendung einer Maßnahme kann der Aufwand, z. B. aufgrund einer größeren Anzahl verkehrender Züge, steigen. Es wird angenommen, dass, solange der Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 eingehalten ist, der zusätzliche Aufwand durch eine Maßnahme nicht berücksichtigt werden muss und daher die Personalkosten konstant bleiben.

Sollte durch den Einsatz einer Maßnahme der Qualitätsfaktor nicht mehr eingehalten, die Arbeitszeit über das übliche Maß hinaus verlängert oder weiteres Personal benötigt werden (z. B. Umleitung

eines Zuges), werden diese zusätzlichen Kosten über die Einsatzzeit und einen entsprechenden Kostensatz für einen Fahrdienstleiter berücksichtigt. Dies ist in Formel 9-15 dargestellt (Deutsche Bundesbahn 1961).

$$K_{\text{Personal,Nebenstrecke}} = \alpha_{\text{Fdl}} \cdot t_{\text{Streckenöffnung}} \cdot n_{\text{Fdl}} \quad 9-15$$

Dabei sind:

- $K_{\text{Personal, Nebenstrecke}}$ Personalkosten der Nebenstrecke [€]
- α_{Fdl} Kostensatz für Lohnkosten eines Fahrdienstleiters [€/h]
- $t_{\text{Streckenöffnung}}$ Zeitraum der Streckenöffnung (= Einsatzzeit des Fdl) [h]
- n_{Fdl} Anzahl der benötigten Fahrdienstleiter [-]

Energiekosten

Die Kosten für die Energie lassen sich aufgliedern in

- Energiebereitstellung für Oberleitung/Tankstellen in Abhängigkeit des Verbrauchs
- Energieeinkauf in Abhängigkeit des Verbrauchs
- Energiebedarf des EIU

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Energiebedarf des EIU als fix angesehen, sodass dieser keine Änderung bei Anwendung einer Maßnahme erfährt. Die Energiebereitstellung und der Energieeinkauf werden über die Energiekosten beim EVU (s. u.) berücksichtigt.

Verbrauchsstoffe

Wie bereits beschrieben werden die Kosten der Verbrauchsstoffe im Rahmen der Arbeit nicht weiter betrachtet, da es zu keiner mengenmäßigen Änderung der Verbrauchsstoffe kommt.

Einmalige Kosten

Rückbau und Entsorgung

Ist es nicht mehr möglich, die Infrastruktur instand zu halten, entstehen Kosten für den Rückbau und die Entsorgung. Es wird davon ausgegangen, dass dies nach Anwendung einer Maßnahme nicht erforderlich ist, sodass keine einmaligen Kosten entstehen.

Gemeinkosten

In den Gemeinkosten werden alle fixen Kosten zusammengefasst, die indirekt im Zusammenhang mit der Erbringung der Betriebsleistung stehen. Diese beinhalten „Planungskosten, Kosten der Unternehmensleitung, der Verwaltung, für Stabsabteilungen [...], Kosten für zentrale Einrichtungen (Werkstädte, Instandhaltungseinrichtungen und Geschäftsgebäude, sowie Steuern, Versicherungen und amtliche Gebühren“ (Dickenbrok 2012). Die Gemeinkosten werden bei einer Vollkostenrechnung mit Hilfe von Zuschlagsschlüsseln einzelnen Kostenarten zugeteilt. In einer Teilkostenrechnung ist dies nicht notwendig, da die Gemeinkosten als auslastungsunabhängig angesehen werden. Sie werden daher in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

9.2.3 Kostenarten eines EVU

Wie in Kapitel 3.10 beschrieben wird in dieser Arbeit nach folgenden Kostenarten unterschieden:

- Kapitalkosten: Abschreibung und Verzinsung
- Instandhaltungskosten: Entstörung, Wartung, Inspektion und Instandsetzung
- Betriebskosten: Personal, Energie, Verbrauchsstoffe, Trassenpreise, Stationspreise und Anlagenpreise
- Einmalige Kosten: Demontage und Entsorgung
- Gemeinkosten: Planung, Verwaltung, Unternehmensleitung, Steuern, Versicherungen und Vertrieb

Kapitalkosten

Die Kapitalkosten berücksichtigen „[...] die Abschreibung und die Verzinsung des durch ein Schienenfahrzeug gebundenen Kapitals über den Nutzungszeitraum“ (Dickenbrok 2012). Die Abschreibung bildet somit den Wertverlust über die Zeit ab. Es wird zwischen bilanzmäßiger und kalkulatorischer Abschreibung unterschieden (Jackisch 2006).

Abschreibung

Bei der bilanzmäßigen Abschreibung werden für jedes Fahrzeug Nutzungsdauern im Rahmen der Abschreibungstabellen für allgemein verwendbare Anlagengüter (AfA-Tabellen) festgesetzt. Diese beträgt z. B. für Lokomotiven 20 Jahre (Bundesfinanzministerium 1998). Eine lineare Abschreibung ist eine übliche Form bei der Eisenbahn (Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik 2016b). Dabei wird die jährliche Abschreibungsrate so gewählt, dass nach 20 Jahren der Investitionswert abgeschrieben ist.

Die kalkulatorische Abschreibung und deren Rate werden über die Laufleistung eines Fahrzeugs berechnet. Dabei wird nicht die Nutzungsdauer, sondern die Laufleistung als Bezugswert angenommen. Wird durch die Anwendung einer Maßnahme die Laufleistung geändert, sodass der Bezugswert der Laufleistung eher erreicht wird, muss das Fahrzeug zu einem früheren Zeitpunkt abgeschrieben sein. Das hat eine Erhöhung der Abschreibungsrate und somit zusätzliche Kosten zur Folge.

Zur Kostenberechnung wird die kalkulatorische Abschreibung verwendet. Die Berechnung der Kostenänderung ist in Formel 9-16 dargestellt. (Deutsche Bundesbahn 1961)

$$\Delta K_{\text{kalk. Abschreibung}} = \frac{\alpha_{\text{kalk}}}{t_{\text{Einsatz}}} \cdot \Delta t_{\text{Bef}} \quad 9-16$$

$$\alpha_{\text{kalk}} = \frac{WBW - SW}{n} \quad 9-17$$

$$WBW = AK \cdot (1 + IR)^n \quad 9-18$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{\text{kalk. Abschreibung}}$ Kostenänderung der kalkulatorischen Abschreibung [€]
- α_{kalk} kalkulatorische Abschreibungsrate [€/a]
- Δt_{Bef} Änderung der Beförderungszeit [min]
- t_{Einsatz} maximale jährliche Einsatzzeit [min/a]
- WBW Wiederbeschaffungswert [€]
- SW Schrottwert [€]
- n reale Nutzungsdauer [a]
- AK Anschaffungskosten [€]
- IR Inflationsrate [-]

Verzinsung

Das Kapital wird z. B. für die Anschaffung von Fahrzeugen benötigt. Dieses kann entweder über Eigenkapital oder Kredite aufgebracht werden. Das in den Fahrzeugen gebundene Kapital wird mit Hilfe von kalkulatorischen Zinsen verzinst (Springer Verlag). „Aufgrund des Nebeneinanders diverser Finanzierungsquellen (Eigenkapital, unterschiedliche Fremdkapitalarten) löst man sich üblicherweise von den tatsächlichen (pagatorischen) Finanzierungskosten und setzt für die gesamte Kapitalbindung einen einheitlichen Kapitalkostensatz an“ (Springer Verlag).

Aus der o. g. Kostenänderung der kalkulatorischen Abschreibung ergibt sich direkt eine kalkulatorische Verzinsung, da das Kapital gebunden ist und nicht anderweitig verwendet werden kann. Die kalkulatorischen Zinsen ergeben sich aus dem Produkt des betriebsnotwendigen Kapitals (= Kostenänderung der kalkulatorischen Abschreibung) und dem Zinssatz (Jackisch 2006). Die zusätzlichen Kosten für die kalkulatorische Verzinsung sind in Formel 9-19 dargestellt.

$$\Delta K_{\text{kalk. Verzinsung}} = \Delta K_{\text{kalk. Abschreibung}} \cdot Z_{\text{kalk}} \quad 9-19$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{\text{kalk. Verzinsung}}$ Kostenänderung der kalkulatorischen Verzinsung [€]
- $\Delta K_{\text{kalk. Abschreibung}}$ Kostenänderung der kalkulatorischen Abschreibung [€]
- Z_{kalk} kalkulatorischer Zinssatz [-]

Instandhaltungskosten

Die Fahrzeuge sind durch den Betrieb einer Belastung ausgesetzt. Diese führt zu einem Verschleiß, dem, im Rahmen der Instandhaltung (Entstörung, Wartung, Inspektion und Instandsetzung), fortlaufend entgegengewirkt werden muss. Dadurch wird aber nicht verhindert, dass das Fahrzeug nach Ablauf der Nutzungsdauer ersetzt werden muss. Im Rahmen der Arbeit werden die Fahrzeuge in zwei Gruppen unterteilt: Triebfahrzeuge und Wagen.

Bei Triebfahrzeugen wird zwischen einem anstrengungsabhängigen und einem zeitabhängigen Anteil der Instandhaltungskosten unterschieden (Deutsche Bundesbahn 1961). Die Kosten, die durch den Betrieb des Triebfahrzeugs entstehen, zählen zu dem anstrengungsabhängigen Anteil und sind abhängig von der induzierten Triebfahrzeugarbeit (z. B. Motorverschleiß) und der Laufleistung (z. B. Abnutzung der Radsätze). Sauer (1984) beschreibt, dass die Kosten des zeitabhängigen Anteils unabhängig von der Beanspruchung des Triebfahrzeugs entstehen. Die Kosten je Fahrzeug und Jahr

können als fix angenommen werden, da es sich um zeitlich festgelegte Untersuchungen handelt. In Abhängigkeit von der jährlichen Einsatzzeit und der realisierten Beförderungszeit können die Jahreskosten des zeitabhängigen Anteils auf eine Zugfahrt umgelegt werden (Oetting 2005).

Bei Wagen kann ferner zwischen Reisezugwagen und Güterwagen unterschieden werden. Die Wagen werden bei Zugbildung, Abfertigung und Zugfahrt beansprucht. Die Instandhaltungskosten werden, analog zur „Vorschrift für die Berechnung der Kosten einer Zugfahrt“, nur für den Verschleiß, der durch eine Zugfahrt entsteht, berechnet (Deutsche Bundesbahn 1961). Des Weiteren erfolgt eine Unterteilung in beförderungszeitabhängige, laufwegsabhängige und lastabhängige Kosten (Sauer 1984).

Hier ist ebenfalls die Bestimmung von Kostensätzen erforderlich. Dazu werden die jährlichen Instandhaltungskosten prozentual von den Fahrzeuganschaffungskosten hergeleitet und somit in relative Kostensätze umgewandelt (Dickenbrok 2012). Die relativen Kostensätze sind in Tabelle 9-3 dargestellt.

Tabelle 9-3: Relative Kostensätze für Instandhaltung von Schienenfahrzeugen (Dickenbrok 2012)

Fahrzeug	Typ	Relativer Kostensatz [-]
Lokomotive	E-Lok	0,04
	Diesellok	0,065
Triebwagen	elektrisch	0,04
	dieselbetrieben	0,065
Personenzugwagen	-	0,04
Güterwagen	-	0,03

Für die zeit- und laufwegsabhängigen Kosten sind in Tabelle 9-4 beispielhafte Werte für verschiedene Fahrzeugtypen dargestellt.

Tabelle 9-4: Jährliche Laufleistungen und Einsatzzeiten von Fahrzeugen (Dickenbrok 2012)

Zug	Fahrzeug	Laufleistung [km/a]	Einsatzzeit [h/a]	Einsatzzeit [min/a]
Fernreisezug	Triebwagen	500.000	3.650	219.000
	Lokbespannung	320.000	3.300	198.000
Nahreisezug	E-Traktion	150.000	2.000	120.000
	Diesellok	130.000	2.000	120.000
Güterzug	E-Lok	150.000	2.110	126.600
	Diesellok	80.000	1.925	115.500
	Wagen	22.000	320	19.200

Dickenbrok (2012) gibt für die spezifischen Kostensätze folgende Formeln an:

$$K_{Inst,l} = \frac{AK \cdot p_{Inst} \cdot p_l}{l_{LL}} \quad 9-20$$

$$K_{Inst,t} = \frac{AK \cdot p_{Inst} \cdot (1 - p_l)}{t_{Einsatz}} \quad 9-21$$

Dabei sind:

- $K_{Inst,l}$ Kostensatz für laufwegabhängige Instandhaltung eines Fahrzeugs [€/km]
- $K_{Inst,t}$ Kostensatz für zeitabhängige Instandhaltung eines Fahrzeugs [€/min]
- AK Anschaffungskosten Fahrzeug [€]
- p_{Inst} relativer Instandhaltungskostensatz in Abhängigkeit von AK [-]
- p_l relativer Anteil der wegabhängigen an den gesamten Instandhaltungskosten [-]
- l_{LL} jährliche Laufleistung [km/a]
- $t_{Einsatz}$ jährliche Einsatzzeit [min/a]

Dickenbrok (2012) führt keine Instandhaltungskosten aus Triebfahrzeugarbeit auf. In der zu entwickelnden Kostenformel werden diese, in Anlehnung an die „Vorschrift für die Berechnung der Kosten einer Zugfahrt“, berücksichtigt (Deutsche Bundesbahn 1961).

Den zeitabhängigen Instandhaltungskosten wird ein Anteil von 25 % an den gesamten Instandhaltungskosten zugrunde gelegt (BMVBS 2006). Daraus ergibt sich, dass die laufwegsabhängigen Kosten einen Anteil von 75 % haben und somit $p_l = 0,75$ (s. o.) ist.

Die Anschaffungskosten der Schienenfahrzeuge liegen für das Jahr 2008 vor und werden, wie die Herstellkostensätze der Instandhaltung eines EIU, auf das Bezugsjahr 2016 hochgerechnet. Dazu werden Formel 9-22 und Tabelle 9-5 verwendet (Dickenbrok 2012).

$$AK_t = AK_0 \cdot \frac{p_{EPI,t}}{p_{EPI,0}} \quad 9-22$$

Dabei sind:

- AK_t Anschaffungskosten für das Bezugsjahr t [€]
- AK_0 Anschaffungskosten für das Erhebungsjahr der Datenquelle [€]
- $p_{EPI,t}$ Erzeugerpreisindex für das Bezugsjahr t [-]
- $p_{EPI,0}$ Erzeugerpreisindex für das Erhebungsjahr der Datenquelle [-]

Tabelle 9-5: Bestimmung des Herstellkostensatzes für das Jahr 2016 (Dickenbrok 2012), (Statistisches Bundesamt 2017b)

Erzeugerpreisindex	AK 2008 = K_{2008} [€]	EP-Index 2016 = $p_{EPI,2016}$ EP-Index 2008 = $p_{EPI,2008}$	AK 2016 = K_{2016} [€]
Fernreisezug E-Lok	3.200.000	106,2/100,8	≈ 3.370.000
Fernreisezug Wagen	1.400.000	106,2/100,8	≈ 1.475.000
Nahreisezug E-Lok	2.630.000	106,2/100,8	≈ 2.771.000
Nahreisezug Wagen	1.400.000	106,2/100,8	≈ 1.475.000
Güterzug E-Lok	3.000.000	106,2/100,8	≈ 3.161.000
Güterzug Wagen	75.000	106,2/100,8	≈ 79.000

Instandhaltungskosten Triebfahrzeug

Nach Deutsche Bundesbahn (1961) ergibt sich die Änderung der anstrengungsabhängigen Kosten eines Triebfahrzeuges nach Formel 9-23.

$$\Delta K_{IH,Tfz,a} = \alpha_{L,Tfz} \cdot \Delta L + \alpha_A \cdot \Delta A \quad 9-23$$

$$\alpha_{L,Tfz} = \frac{e_1 \cdot \alpha_{a,Tfz}}{L_{d,Tzf}}, \quad \alpha_A = \frac{e_2 \cdot \alpha_{a,Tfz}}{A_{ld}}, \quad \Delta A = \Delta A_l + \Delta A_{bl} \quad 9-24$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{IH,Tfz,a}$ Kostenänderung der anstrengungsabhängigen Instandhaltung eines Tfz [€]
- $\alpha_{L,Tfz}$ Kostensatz für laufwegabhängige Instandhaltung eines Tfz [€/km]
- ΔL Änderung der Laufwegslänge [km]
- α_A Kostensatz für Tfz-Arbeit-abhängige Instandhaltung [€/J]
- ΔA Änderung der Triebfahrzeugarbeit
- e Verhältniszahlen e_1 und e_2 zur Abbildung der Anteile von laufwegabhängigen und arbeitsabhängigen Kosten an den jährlichen anstrengungsabhängigen Instandhaltungskosten [-]
- $\alpha_{a,Tfz}$ jährlich anfallende anstrengungsabhängige Instandhaltungskosten eines Tfz [€/a]
- $L_{d,Tfz}$ durchschnittliche jährliche Laufleistung eines Tfz [km/a]
- A_{ld} durchschnittliche jährliche Triebfahrzeugarbeit [J/a]
- ΔA_l Änderung der induzierten Triebfahrzeugarbeit [J]
- ΔA_{bl} Änderung der Bremsarbeit eines Triebfahrzeuges [J]

Die Berechnung der zeitabhängigen Instandhaltungskosten eines Triebfahrzeuges ist in Formel 9-25 dargestellt (Deutsche Bundesbahn 1961).

$$\Delta K_{IH,Tfz,z} = \alpha_{z,Tfz} \cdot \Delta t_{Bef} \quad 9-25$$

$$\alpha_{z,Tfz} = \frac{\alpha_{a,Tfz}}{t_{Einsatz}} \quad 9-26$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{IH,Tfz,z}$ Kostenänderung der zeitabhängigen Instandhaltung eines Tfz [€]
- $\alpha_{z,Tfz}$ Kostensatz für zeitabhängige Instandhaltung eines Tfz [€/min]
- Δt_{Bef} Änderung der Beförderungszeit [min]
- $\alpha_{z,Tfz}$ jährlich anfallende zeitabhängige Instandhaltungskosten eines Tfz [€/min]
- $t_{Einsatz}$ maximale jährliche Einsatzzeit [min/a]

Instandhaltungskosten Reisewagenzug

Nach Deutsche Bundesbahn (1961) ergibt sich die Änderung der Kosten eines Reisewagenzuges nach Formel 9-27.

$$\Delta K_{IH,RW} = (\alpha_{L,RW} \cdot \Delta L + \alpha_{z,RW} \cdot \Delta t_{Bef}) \cdot a \quad 9-27$$

$$\alpha_{L,RW} = \frac{\alpha_{l,RW}}{L_{d,RW}}, \quad \alpha_{z,RW} = \frac{\alpha_{z,RW}}{t_{Einsatz}} \quad 9-28$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{IH,RW}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Reisewagenzuges [€]
- $\alpha_{L,RW}$ Kostensatz für laufwegabhängige Instandhaltung eines Reisewagens [€/km]
- ΔL Änderung der Laufweglänge [km]
- $\alpha_{z,RW}$ Kostensatz für zeitabhängige Instandhaltung eines Reisewagens [€/min]
- Δt_{Bef} Änderung der Beförderungszeit [min]
- a Anzahl der Wagen [-]
- $\alpha_{l,RW}$ jährlich anfallende laufwegabhängige Instandhaltungskosten eines Reisewagens [€/a]
- $L_{d,RW}$ durchschnittliche jährliche Laufleistung eines Reisewagens [km/a]
- $\alpha_{z,RW}$ jährlich anfallende zeitabhängige Instandhaltungskosten eines Reisewagens [€/a]
- $t_{Einsatz}$ maximale jährliche Einsatzzeit [min/a]

Die gesamten Instandhaltungskosten von Reisezügen ergeben sich somit nach Formel 9-29.

$$\Delta K_{IH,Reisezug} = \Delta K_{IH,Tfz} + \Delta K_{IH,RW} \quad 9-29$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{IH,Reisezug}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Reisezuges [€]
- $\Delta K_{IH,Tfz}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Triebfahrzeuges [€]
- $\Delta K_{IH,RW}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Reisewagenzuges [€]

Instandhaltungskosten Güterwagenzug

Nach Deutsche Bundesbahn (1961) ergibt sich die Änderung der Kosten eines Güterwagenzuges nach Formel 9-30.

$$\Delta K_{IH,GW} = \alpha_{z,GW} \cdot \Delta t_{Bef} \cdot a + \alpha_{L,GW} \cdot \Delta L \cdot b + \alpha_{M,GW} \cdot \Delta V \quad 9-30$$

$$\alpha_{z,GW} = \frac{\alpha_{z,GW}}{t_{Einsatz}}, \quad \alpha_{L,GW} = \frac{\alpha_{L,GW}}{L_{d,GW}}, \quad \alpha_{M,GW} = \frac{\alpha_{M,GW}}{V_d} \quad 9-31$$

$$\Delta V = (L \cdot \Delta m) + [\Delta L \cdot (m + \Delta m)] \quad 9-32$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{IH,GW}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Güterwagenzuges [€]
- $\alpha_{z,GW}$ Kostensatz für zeitabhängige Instandhaltung eines Güterwagens [€/min]
- Δt_{Bef} Änderung der Beförderungszeit [min]
- a Anzahl der Wagen [-]
- $\alpha_{L,GW}$ Kostensatz für laufwegabhängige Instandhaltung eines Güterwagens [€/km]
- ΔL Änderung der Laufweglänge [km]
- b Anzahl der Achsen des Güterwagenzuges [-]
- $\alpha_{M,GW}$ Kostensatz für lastabhängige Instandhaltung eines Güterwagens [€/(t•km)]
- ΔV Änderung der Beförderungsleistung eines Güterwagenzuges [t•km]
- $\alpha_{z,GW}$ jährlich anfallende zeitabhängige Instandhaltungskosten eines Güterwagens [€/a]
- $t_{Einsatz}$ maximale jährliche Einsatzzeit [min/a]
- $\alpha_{L,GW}$ jährlich anfallende laufwegabhängige Instandhaltungskosten einer Güterwagenachse [€/a]
- $L_{d,GW}$ durchschnittliche jährliche Laufleistung einer Güterwagenachse [km/a]
- $\alpha_{M,GW}$ jährlich anfallende lastabhängige Instandhaltungskosten eines Güterwagenzuges [€/a]
- V_d durchschnittliche jährliche Beförderungsleistung eines Güterwagenzuges [t•km/a]
- L Ausgangslaufweglänge [km]
- Δm Änderung der Güterwagenzugmasse [t]
- m Ausgangsgüterwagenzugmasse [t]

Die Beförderungsleistung kann sich entweder bei einer Abweichung der Laufweglänge und/oder einer Abweichung der Masse des Wagenzuges ergeben. Die Abweichung der Laufweglänge wird mit dem Term „ $[\Delta L \cdot (m + \Delta m)]$ “ und die Abweichung der Wagenzugmasse mit dem Term „ $(L \cdot \Delta m)$ “ berücksichtigt.

Die gesamten Instandhaltungskosten von Güterzügen ergeben sich somit nach Formel 9-33.

$$\Delta K_{IH,Güterzug} = \Delta K_{IH,Tfz} + \Delta K_{IH,GW} \quad 9-33$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{IH,Güterzug}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Güterzuges [€]
- $\Delta K_{IH,Tfz}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Triebfahrzeuges [€]
- $\Delta K_{IH,GW}$ Kostenänderung der Instandhaltung eines Güterwagenzuges [€]

Betriebskosten

Bei den Kosten des Betriebes wird zwischen Personal, Energie, Verbrauchsstoffen, Trassenpreisen, Stationspreisen und Anlagenpreisen unterschieden. Es wird angenommen, dass die Kosten für die Zugabfertigung, die Zugbildung und die Unterhaltung mit den genannten Kosten abgedeckt sind.

Personalkosten

Bei den Personalkosten kann zwischen den Kosten für Triebfahrzeugführer und den Kosten für Zugbegleitpersonal unterschieden werden (Dickenbrok 2012). Die Kosten einer Zugfahrt für einen Triebfahrzeugführer ergeben sich nach Formel 9-34 (Deutsche Bundesbahn 1961):

$$K_{Tf} = \frac{\text{Jahreseinkommen}_{Tf}}{\text{Jahresdienststunden}_{Tf} \cdot (1 - \eta)} \cdot \text{Einstzzeit}_{Tf} \quad 9-34$$

Mit dem Term „ $(1 - \eta)$ “ erfolgt eine Reduzierung der Jahresdienststunden um den ungenutzten Anteil (Urlaub, Feiertage, Krankheit, Dienstbefreiung und Fortbildung) der Arbeitszeit, da dieser keinen kommerziellen Nutzen erbringt. Mit der Einsatzzeit werden die Fahrzeit und die Stillstandszeit innerhalb einer Zugfahrt zusammengefasst.

Um nun einen Kostensatz für einen Triebfahrzeugführer zu erhalten, muss eine Nettojahresarbeitszeit berechnet werden. Dies ist in Tabelle 9-6 dargestellt.

Tabelle 9-6: Berechnung der Nettojahresarbeitszeit (Dickenbrok 2012)

	Berechnung	Ergebnis
Bruttojahresarbeitszeit	52 w/a • 38 h/w	1.976 h/a
Urlaub	- 30 d/a • 7,6 h/d	- 228 h/a
Feiertage	- 11 d/a • 7,6 h/d	- 83,6 h/a
Krankheit	- 3,2 % der Bruttojahresarbeitszeit	- 63,2 h/a
Fortbildung	pauschal	- 10 h/a
Nettojahresarbeitszeit	-	1.591,2 h/a

Mit dieser Arbeitszeit kann ein Bruttojahreslohn exklusive der Lohnnebenkosten berechnet werden. Nach GDL (2015) beträgt der durchschnittliche Bruttostundenlohn 17,73 € für das Jahr 2012. Wird dieser Wert mit der Nettojahresarbeitszeit von 1.591,2 h/a multipliziert, ergibt sich ein Bruttojahreslohn exklusive der Lohnnebenkosten von 28.211,98 €. Der Anteil der Lohnnebenkosten kann aus der Arbeitskostenerhebung des statistischen Bundesamtes ermittelt werden. Das Amt gibt für Unternehmen mit mindestens 1.000 Arbeitnehmern die gesamten Bruttoarbeitskosten mit 52.402 €

und die Bruttolöhne und –gehälter mit 37.251 € für das Jahr 2012 an (Statistisches Bundesamt 2017a). Daraus ergibt sich ein Verhältnis der Bruttolöhne zu den Bruttoarbeitskosten von 71,1 %. Damit können die Bruttoarbeitskosten für das oben dargestellte Beispiel berechnet werden: $28.211,98 \text{ €} \cdot 100 \% / 71,1 \% = 39.679,29 \text{ €}$. Wird dieser Wert durch die Nettajahresarbeitszeit dividiert, ergibt sich ein Kostensatz von 24,94 €/h. Dieser Wert wird verwendet, wenn sich durch die Anwendung einer Maßnahme die Einsatzzeit des Triebfahrzeugführers verändert.

Die Kosten für das Zugbegleitpersonal werden u. a. vom Statistischen Bundesamt veröffentlicht. Demnach ergibt sich, dass Eisenbahnschaffner ca. 90 % des Bruttojahresverdienstes eines Triebfahrzeugführers erhalten. Der Kostensatz des Zugbegleitpersonals wird somit aus dem Kostensatz des Triebfahrzeugführers bestimmt und beträgt 22,45 €/h (= 24,94 €/h • 0,9). (Statistisches Bundesamt 2009)

Die Beförderungszeit ist die maßgebende Größe zur Bestimmung der Personalkosten. Eine Fahrzeitveränderung wirkt sich direkt auf die Umläufe aus (Oetting 2005). Daher wird die Annahme getroffen, dass das Personal optimal in den Umlaufplänen eingesetzt wird. Somit kommt es bei einer Verlängerung der Beförderungszeit zu zusätzlichen Kosten (siehe Kapital- und Instandhaltungskosten), da das Personal länger gebunden ist und nicht anderweitig eingesetzt werden kann. Die zusätzlichen Kosten werden durch zusätzliches Personal verursacht, da die Nettajahresarbeitszeit limitiert ist. Nach Dickenbrok (2012) ergibt sich die Kostenänderung des Zugpersonals nach Formel 9-35.

$$\Delta K_{\text{Personal}} = \frac{\alpha_{\text{Tf}} \cdot n_{\text{Tf}} + \alpha_{\text{Zub}} \cdot n_{\text{Zub}}}{60 \text{ min/h} \cdot \eta_{\text{PW}}} \cdot \Delta t_{\text{Bef}} \quad 9-35$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{\text{Personal}}$ Kostenänderung des Zugpersonals [€]
- α_{Tf} Kostensatz für einen Triebfahrzeugführer [€/h]
- n_{Tf} Anzahl der Triebfahrzeugführer [-]
- α_{Zub} Kostensatz für ein Zugbegleitpersonal [€/h]
- n_{Zub} Anzahl der Zugbegleitpersonale [-]
- η_{PW} Personalwirkungsgrad [-]
- Δt_{Bef} Änderung der Beförderungszeit [min]

Energiekosten

Den größten Anteil an den Sachkosten haben die Energiekosten für die Zugförderung (Oetting 2005). Es werden daher nur die Kosten der Traktionsenergie betrachtet.

Die Traktionsenergie wird durch den Energielieferanten DB Energie GmbH (siehe Kapitel 3.6.6) bereitgestellt. Da es sich dabei um ein EIU handelt, bewegen sich die Kosten des Energiemehrbedarfs im System Bahn und müssten somit nicht betrachtet werden. Die Energiekosten des EVU wären gleichzeitig Erlöse des EIU. Bei Einsatz einer Maßnahmenart muss gegebenenfalls zusätzliche Energie, als Mehraufwand seitens des EIU, bereitgestellt werden. Dieser Mehraufwand wird über die höheren Traktionskosten des Triebfahrzeugs berücksichtigt, da die Mehrkosten mit dem Mehraufwand gleichgesetzt werden.

DB Energie berechnet für die gelieferte elektrische Energie einen „Arbeitspreis Energie“ von 5,05 ct/kWh (Hochtarif von 06:00 – 22:00 Uhr) bzw. 3,99 ct/kWh (Niedertarif 22:00 – 06:00 Uhr). Daraus wird ein gewichtetes Mittel errechnet und für den Arbeitspreis Energie angesetzt:

$$\text{Arbeitspreis Energie} = \frac{2}{3} \cdot 5,05 \text{ct/kWh} + \frac{1}{3} \cdot 3,99 \text{ct/kWh} = 4,70 \text{ct/kWh}$$

9-36

Zu diesem Arbeitspreis müssen noch Abgaben und Umlagen hinzuaddiert werden. Diese und der endgültige Kostensatz für Bahnstrom sind in Tabelle 9-7 dargestellt.

Tabelle 9-7: Bestimmung des Kostensatzes für Bahnstrom

Komponente	Kostensatz [ct/kWh]	Quelle
Arbeitspreis Energie	4,70	(DB Energie GmbH 2017a)
Netzentgelt	5,81	(DB Energie GmbH 2017a)
Entgelt für Messung	0,0143	(DB Energie GmbH 2017a)
Stromsteuer	1,142	(Bundesrepublik Deutschland 2016f) → ermäßigter Steuersatz nach §9 Absatz 2 StromStG
EEG-Umlage	1,376	(50Hertz Transmission GmbH 2017a); (Bundesrepublik Deutschland 2017a) → Kürzung der EEG-Umlage auf 20 % nach §65: $0,2 \cdot 6,88 \text{ ct/kWh} = 1,376 \text{ ct/kWh}$
KWK-Aufschlag	0,438	(50Hertz Transmission GmbH 2017b)
§19 StromNEV-Umlage	0,388	(50Hertz Transmission GmbH 2017e)
Offshore-Haftungsumlage	-0,028	(50Hertz Transmission GmbH 2017c)
Umlage für abschaltbare Lasten	0,006	(50Hertz Transmission GmbH 2017d)
Summe	13,8463	-

Mit einer Umsatzsteuer von 19 % ergibt sich ein Kostensatz von:

$$\text{Kostensatz}_{\text{Bahnstrom}} = 13,8463 \text{ct/kWh} \cdot 1,19 = 16,48 \text{ct/kWh} = 0,1648 \text{€}/\text{kWh}$$

9-37

Die Kosten der elektrischen Traktionsenergie können nach Deutsche Bundesbahn (1961) berechnet werden und sind in Formel 9-38 dargestellt.

$$\Delta K_{\text{Bahnstrom}} = f \cdot \alpha_{\text{Bahnstrom}} \cdot \Delta B_{\text{Bahnstrom}}$$

9-38

Dabei sind:

- $\Delta K_{\text{Bahnstrom}}$ Kostenänderung des Bahnstrombedarfs [€]
- f Verlustfaktor für die Bahnstromverteilung zwischen Kraftwerk und Fahrdrabt [-]
- $\alpha_{\text{Bahnstrom}}$ Kostensatz für Bahnstrom ab Kraftwerk [€/kWh]
- $\Delta B_{\text{Bahnstrom}}$ Änderung des Bahnstromverbrauchs der Zugfahrt [kWh]

Der Preis für Dieselkraftstofflieferungen setzt sich aus dem Dieselpreis auf Basis des Oil Market Report und dem Bereitstellungspreis zusammen. Da der Dieselpreis variabel ist, wird bei der Berechnung nur

der Bereitstellungspreis berücksichtigt. Dieser beträgt 5,60 ct/Liter bzw. 0,056 €/Liter. (DB Energie GmbH 2013)

Die Kosten für dieselbetriebene Triebfahrzeuge können nach Deutsche Bundesbahn (1961) berechnet werden und sind in Formel 9-39 dargestellt.

$$\Delta K_{Diesel} = \alpha_{Diesel} \cdot \Delta B_{Diesel} \quad 9-39$$

Dabei sind:

- ΔK_{Diesel} Kostenänderung des Dieselbedarfs [€]
- α_{Diesel} Kostensatz für Diesel = Bereitstellungspreis [€/l]
- ΔB_{Diesel} Änderung des Dieselverbrauchs der Zugfahrt [l]

Verbrauchsstoffe

Wie bereits beschrieben werden die Kosten der Verbrauchsstoffe im Rahmen der Arbeit nicht weiter betrachtet, da es durch die Anwendung der Maßnahmen zu keiner mengenmäßigen Änderung der Verbrauchsstoffe kommt.

Trassenpreise

Als letzte Kostenkomponenten der Betriebskosten fallen Trassenpreise, Stationspreise und Anlagenpreise an. Diese Komponenten müssen nur dann betrachtet werden, wenn sich durch den Einsatz einer Maßnahmenart der Laufweg eines Zuges ändert. Ist dies nicht der Fall, sind die Kosten Bestandteil des System Bahn und müssen nicht weiter betrachtet werden. Durch die Änderung können positive Kosten bei einem kürzeren Laufweg und negative Kosten bei einem längeren Laufweg entstehen.

Das Trassenpreissystem der DB Netz AG besteht aus folgenden Komponenten:

- Nutzungsabhängige Komponente
- Leistungsabhängige Komponente
- Lärmabhängige Komponente
- Sonstige Komponenten (DB Netz AG 2016)

Die Bestimmung des Trassenpreises ist in Formel 9-40 dargestellt (DB Netz AG 2016).

$$K_{Trasse} = [((\alpha_{Strecke} \cdot f_{Produkt}) \cdot f_v + \alpha_{Last}) \cdot L] + K_{LaTps} \pm K_{Anreiz} - EM \quad 9-40$$

Dabei sind:

- K_{Trasse} Trassenpreis der Zugfahrt [€]
- $\alpha_{Strecke}$ Grundpreis der Streckenkategorie [€/km]
- $f_{Produkt}$ Produktfaktor [-]
- f_v Geschwindigkeitsfaktor [-]
- α_{Last} Zuschlag für Zugmasse ab 3.000 t [€/km]
- L Laufweg [km]
- K_{LaTPS} Zuschlag für laute Güterzüge [€]
- K_{Anreiz} Anreiz zur Verringerung von Störungen [€]
- EM Entgeltminderung bei nicht vertragsgemäßem Zustand der Infrastruktur [€]

Die Kostenänderung des Trassenpreises erfolgt durch Differenzbildung zwischen dem Preis der Ausgangstrasse und dem Preis der geänderten Trasse. Dies ist in Formel 9-41 dargestellt.

$$\Delta K_{Trasse} = K_{Trasse} - K_{Trasse,neu} \quad 9-41$$

Dabei sind:

- ΔK_{Trasse} Kostenänderung des Trassenpreises [€]
- K_{Trasse} Trassenpreis der Ausgangstrasse [€]
- $K_{Trasse,neu}$ Trassenpreis der geänderten Trasse [€]

Stationspreise

Neben der Änderung des Trassenpreises ist auch eine Änderung der Stationspreise möglich. Ein Preis wird immer dann erhoben, wenn ein EVU einen Verkehrshalt in Anspruch nimmt. Die Stationen sind in sieben Kategorien unterteilt, anhand derer der Stationspreis festgelegt ist. Durch die Aufsummierung aller Stationspreise der Halte während einer Zugfahrt ergibt sich der Stationspreis der Zugfahrt. (DB Station&Service AG 2017)

Die Bestimmung des Stationspreises ist in Formel 9-42 dargestellt.

$$K_{Station} = \sum_{i=1}^n K_{Station,i} \quad 9-42$$

Dabei sind:

- $K_{Station}$ Stationspreise der Zugfahrt [€]
- $K_{Station,i}$ Stationspreise des Bahnhof i [€]
- n Anzahl der Verkehrshalte der Zugfahrt ohne die Startstation [-]

Die Kostenänderung des Stationspreises erfolgt durch Differenzbildung zwischen dem Ausgangspreis und neuen Preis. Dies ist in Formel 9-43 dargestellt.

$$\Delta K_{Station} = K_{Station} - K_{Station,neu} \quad 9-43$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{Station}$ Kostenänderung des Stationspreises [€]
- $K_{Station}$ Stationspreise im Ausgangszustand [€]
- $K_{Station,neu}$ Stationspreise im geänderten Zustand [€]

Anlagenpreise

Die Kosten für Abstellanlagen und andere Anlagen können sich ebenfalls ändern. Die DB Netz AG hat dafür ein Anlagenpreissystem (APS) entwickelt, in dem die Preise für die Nutzung von Serviceeinrichtungen festgelegt sind (DB Netz AG 2015b).

Die Kostenänderung der Anlagenpreise erfolgt durch Differenzbildung zwischen den Ausgangskosten und den neuen Kosten. Dies ist in Formel 9-44 dargestellt.

$$\Delta K_{Anlagen} = K_{Anlagen} - K_{Anlagen,neu} \quad 9-44$$

Dabei sind:

- $\Delta K_{Anlagen}$ Kostenänderung der Anlagenkosten [€]
- $K_{Anlagen}$ Anlagenpreise im Ausgangszustand [€]
- $K_{Anlagen,neu}$ Anlagenpreise im geänderten Zustand [€]

Einmalige Kosten

Demontage und Entsorgung

Ist es nicht mehr möglich, die Fahrzeuge instand zu halten, entstehen Kosten für die Demontage und die Entsorgung. Durch die Anwendung einer Maßnahme könnte sich die Einsatzzeit eines Triebfahrzeuges erhöhen, was zur Folge hat, dass das Ende der Nutzungsdauer zu einem früheren Zeitpunkt erreicht wird. Die Entsorgungskosten werden mit dem Schrottwert des Fahrzeugs im Rahmen der kalkulatorischen Abschreibung (siehe Formel 9-16) berücksichtigt.

Gemeinkosten

In den Gemeinkosten werden alle fixen Kosten zusammengefasst, die indirekt im Zusammenhang mit der Erbringung der Betriebsleistung stehen. Dazu gehören Kosten für Planung, Verwaltung, Unternehmensleitung, Steuern, Versicherungen und Betrieb. Die Gemeinkosten werden bei einer Vollkostenrechnung mit Hilfe von Zuschlagsschlüsseln einzelnen Kostenarten zugeteilt. In einer Teilkostenrechnung ist dies nicht notwendig, da die Gemeinkosten als auslastungsunabhängig angesehen werden. Sie werden daher in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

9.3 Betriebliche Wirkung

9.3.1 Einleitung

Mit dem Kriterium *betriebliche Wirkung* wird die Änderung der Nennleistung durch die Anwendung einer Maßnahme monetär bewertet. Dazu wird die Nennleistung unter Berücksichtigung der Maßnahme der Nennleistung ohne Anwendung einer betrieblichen Maßnahme gegenübergestellt und das Delta berechnet. Dies führt bei den beteiligten Unternehmen zu einer Kosten- und Erlösänderung gegenüber dem Ausgangszustand.

Bei Anwendung einer Maßnahme kann es zu Änderungen bezüglich der Belastung (Anzahl von Zügen), der zeitlichen Belegung durch Züge (Minuten, Stunden) und damit der Leistungsfähigkeit kommen (DB Netz AG 2008). Die jeweilige Maßnahmenart und dort die angewendete Maßnahme bestimmen die Höhe der Änderungen.

9.3.2 Nennleistung

Durch den Einsatz einer Maßnahmenart kann es zu einer Änderung der Nennleistung kommen. Die Veränderung ergibt sich aus der Differenz mit und ohne den Einsatz. Die Nennleistung kann verringert oder erhöht werden oder unverändert bleiben. Mit Formel 9-45 wird die Nennleistung nach DB Netz AG (2008) berechnet.

$$L_0 = \frac{zul \sum t_{Wa}}{t_{Wm}} \quad 9-45$$

$$zul \sum t_{Wa} = q_Q \cdot 0,260 \cdot e^{-1,3 \cdot pRz} \cdot T_U \quad 9-46$$

Dabei sind:

- L_0 Nennleistung [-]
- $zul \sum t_{Wa}$ zulässige Summe der außerplanmäßigen Wartezeiten [min]
- t_{Wm} mittlere Folgeverspätung aus Einfädeln und Kreuzen [min]
- q_Q Qualitätsfaktor [-]
- pRz Anteil Reisezüge [%]
- T_U Untersuchungszeitraum [min]

Für den Faktor q_Q gelten nach DB Netz AG (2008) die in Tabelle 9-8 dargestellten Werte.

Tabelle 9-8: Werte für Qualitätsfaktor q_Q (DB Netz AG 2008)

Premiumqualität	Wirtschaftlich optimal	Risikobehaftet	Mangelhaft, nicht marktgerecht
< 0,5	1,0 (0,5 ... 1,2)	> 1,2 ... 1,3 (noch offen)	> 1,5

Für die Berechnung der zulässigen Summe der außerplanmäßigen Wartezeiten wird für den Faktor q_Q der Wert 1,0 (wirtschaftlich optimal) angenommen. Somit ergibt sich für einen Streckenstandard M 160 mit einem Reisezuganteil von 1/3 (50 zu 150 Züge) und einem Untersuchungszeitraum von

24 Stunden eine zulässige Summe der außerplanmäßigen Wartezeiten von 242,74 min. Diese Summe wird durch den Wert der mittleren Folgeverspätung aus Einfädeln und Kreuzen dividiert. Der Quotient ergibt die Nennleistung. Durch den Einsatz einer Maßnahmenart können sich die mittlere Folgeverspätung aus Einfädeln und Kreuzen und somit auch die Nennleistung ändern. Es kann der Fall eintreten, dass die vorgegebene Zugzahl nicht mehr aufgenommen werden kann und Züge entfallen müssen.

Die monetäre Bewertung erfolgt zum einen über die Kostenverringerung aufgrund des Ausfalls von Zügen. Dies betrifft sowohl das EIU, da weniger Züge fahren und z. B. der Oberbau weniger belastet wird, als auch das EVU, da z. B. die Kosten für einen Triebfahrzeugführer entfallen.

Zum anderen ergibt sich eine Erlösminderung auf EVU-Seite. Diese ergibt sich aufgrund der verlängerten Fahrzeit und der Multiplikation der entfallenen Züge mit dem Wert der mittelbaren Erlösminderung (s. u.).

Die verminderten Trassenerlöse auf EIU-Seite entstehen in gleicher Höhe auf EVU-Seite als verminderte Trassenkosten und müssen nicht weiter betrachtet werden, da diese sich neutralisieren.

Die Änderung des Gewinns ist in Formel 9-47 dargestellt.

$$\Delta\text{Gewinn} = \text{Kostenverringerung} - \text{Erlösminderung} \quad 9-47$$

Dabei sind:

- ΔGewinn Änderung des Gewinns [€]
- Kostenverringerung aufgrund des Ausfalls von Zügen (siehe Kapitel 9.2) [€]
- Erlösminderung s. u. (mittelbare Erlösminderungen) [€]

Für die Veränderung des Gewinns sind drei Ausprägungen möglich:

- positiv: Verringerung der Gesamtkosten
- negativ: Erhöhung der Gesamtkosten
- null: gleichbleibende Gesamtkosten

Die Veränderung des Gewinns wird von den Kosten, die bei Anwendung einer Maßnahme entstehen, subtrahiert. Daraus ergeben sich die Gesamtkosten einer Maßnahme.

Sollte durch eine Maßnahme ein Streckenwechsel notwendig werden, so müssen jeweils die Änderungen der Nennleistungen auf beiden Strecken berechnet werden. Es kann der Fall eintreten, dass die mittlere Folgeverspätung aus Einfädeln und Kreuzen auf der Ausgangsstrecke sinkt, da z. B. für einen Zug eine Umleitungsstrecke vorgesehen ist und dieser nicht mehr auf der Strecke verkehrt. Gleichzeitig steigt die mittlere Folgeverspätung auf der Umleitungsstrecke, da dort nun ein zusätzlicher Zug verkehrt. Die Veränderung des Gewinns und die Gesamtkosten der Maßnahme sind dann ebenfalls für beide Strecken zu berechnen.

Bei den mittelbaren Erlösminderungen wird zwischen EIU und EVU unterschieden.

9.3.3 Mittelbare Erlösminderungen EIU

Die Bestandteile der mittelbaren Erlösminderungen eines EIU wurden bereits oben und in Kapitel 3.10 erläutert. Daher werden diese hier nicht erneut aufgeführt.

9.3.4 Mittelbare Erlösminderungen EVU

„Die Höhe der Erlöse eines EVU wird bestimmt durch die Anzahl der beförderten Reisenden und die Menge der transportierten Güter sowie dem Erlös je Reisenden oder je Mengeneinheit. Im Personennahverkehr werden zusätzlich Erlöse aus Bestellerverträgen erzielt“ (Dickenbrok 2012). Aufgrund der verschiedenen Entgeltsysteme und der unterschiedlichen Beförderungsentfernungen wird zwischen dem Schienenpersonenfern-, Schienenpersonennah- und dem Schienengüterverkehr unterschieden. Die Erlöse werden in Abhängigkeit der Verkehrsart aus Fahrkartenverkäufen, Transportentgelten oder Bestellerverträgen erzielt (Dickenbrok 2012).

Im Nahverkehr wird nach der Vergabeart des Verkehrsvertrages unterschieden. Es existieren Brutto- und Nettoverträge.

Im Rahmen des Bruttovertrages fließen sämtliche Fahrgeldeinnahmen an den Aufgabenträger. Er trägt somit das Einnahmerisiko. Der Aufgabenträger zahlt dem EVU einen fixen Betrag pro Kilometer.

Im Gegensatz dazu erhält das EVU bei einem Nettovertrag sämtliche Fahrgeldeinnahmen und zusätzlich einen fixen Zuschuss vom Aufgabenträger. Somit liegt das Einnahmerisiko beim EVU. (Wölfel 2013)

Die Zahlungen des Aufgabenträgers werden als Bestellerentgelte bezeichnet. Die Entgelte decken bei Nettoverträgen denjenigen Kostenanteil der vom EVU erbrachten Leistung ab, der nicht über die Fahrgeldeinnahmen abgedeckt werden kann (Gutachterkonsortium 2014). Zur Erzielung eines wirtschaftlichen Ergebnisses müssen mindestens die im Rahmen des Verkehrsvertrages kalkulierten Fahrgelderlöse durch das EVU eingenommen werden. Für ein EVU ist es ebenfalls wichtig, die Wünsche des Bestellers zu erfüllen, da die Einnahmen aus den Bestellerentgelten teilweise deutlich höher ausfallen als die Einnahmen aus Fahrgelderlösen (Rothenstein 2010).

Weitere Mischformen bezüglich der Vertragsarten und die Risikoverteilung sind im „Marktreport SPNV“ dargestellt (BSL 2013).

Beim Schienenpersonenfern- und Schienengüterverkehr handelt es sich um eigenwirtschaftliche Verkehre, dies hat zur Folge, dass die Erlöse ausschließlich aus Fahrgeldeinnahmen bzw. Frachtgeldeinnahmen erzielt werden.

Erlöse im Schienenpersonenverkehr

Nach Oetting (2005) ist die Höhe der Erlöse eines Zuges im Schienenpersonenverkehr abhängig von folgenden Komponenten:

- Länge der untersuchten Strecke
- Anzahl Reisende im Zug
- spezifischer Erlös je Reisendem und Kilometer

Die genannten Komponenten und die zugehörigen Formeln werden in Oetting (2005) detailliert und übersichtlich dargestellt. Des Weiteren wird zwischen Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr unterschieden. Dies wird für die Arbeit übernommen.

Neben der streckenbezogenen Betrachtung ist auch eine Betrachtung von Quell-Ziel-Relationen möglich. Diese sind sehr aufwendig, „da Berechnungen für jede Relation, die für die betrachtete Strecke relevant sind, erforderlich werden“ (Oetting 2005).

Aus den genannten Gründen ergibt sich der Erlös eines Zuges nach Oetting (2005) nach Formel 9-48.

$$E_{Zug,SPV} = L_{Abschnitt} \cdot F \cdot E_{spez,SPV} \cdot f_{N,SPV} \quad 9-48$$

Dabei sind:

- $E_{Zug,SPV}$ Erlös eines Zuges im Schienenpersonenverkehr [€]
- $L_{Abschnitt}$ Länge des untersuchten Streckenabschnitts [km]
- F Anzahl Reisende im Zug [P]
- $E_{spez,SPV}$ spezifischer Erlös je Reisendem und Kilometer [€/Pkm]
- $f_{N,SPV}$ Faktor zur Berücksichtigung der Nachfragereaktion auf die Qualität:
 $0 \leq f_{N,SPV} \leq 1$ [-]

Mit Formel 9-48 werden die Erlöse ohne und mit Anwendung einer Maßnahme für den Fern- und Nahverkehr berechnet. Durch die Anwendung einer Maßnahme ergibt sich eine Änderung des Faktors zur Berücksichtigung der Nachfragereaktion. Damit können eine Erlösminderung und eine Änderung des Gewinns (siehe Formel 9-47) berechnet werden.

Aus der Division von Erlösen aus Fahrgeldeinnahmen und der erbrachten Verkehrsleistung kann ein mittlerer spezifischer Erlös berechnet werden (Dickenbrok 2012). So ergibt sich für das Jahr 2015 mit Fahrgelderlösen von 3,912 Mrd. Euro und einer Verkehrsleistung von 37,0 Mrd. Pkm nach Formel 9-49 der spezifische Erlös aus Fahrgeldeinnahmen für den Schienenpersonenfernverkehr (DB Fernverkehr AG 2016).

$$E_{spez,SPFV} = \frac{3,912 \text{ Mrd. €}}{37,0 \text{ Mrd. Pkm}} = 0,106 \frac{\text{€}}{\text{Pkm}} \quad 9-49$$

Analog lässt sich für das Jahr 2015 der spezifische Erlös im Schienenpersonennahverkehr mit Erlösen von 2,752 Mrd. € und einer Verkehrsleistung von 34,7 Mrd. Pkm nach Formel 9-50 ermitteln (DB Regio AG 2017).

$$E_{spez,SPNV,Fahrgeld} = \frac{2,752 \text{ Mrd. €}}{34,7 \text{ Mrd. Pkm}} = 0,079 \frac{\text{€}}{\text{Pkm}} \quad 9-50$$

Ebenso berechnet sich für das Jahr 2015 der spezifische Erlös aus Bestellerverträgen im Schienenpersonennahverkehr. Dieser Erlös ergibt sich mit Bestellerentgelten von 3,442 Mrd. Euro und einer Verkehrsleistung von 34,7 Mrd. Pkm nach Formel 9-51 (DB Regio AG 2017).

$$E_{spez,SPNV,Besteller} = \frac{3,442 \text{ Mrd. €}}{34,7 \text{ Mrd. Pkm}} = 0,099 \frac{\text{€}}{\text{Pkm}} \quad 9-51$$

In Formel 9-52 wird der Faktor $f_{N,SPV}$ nach Oetting (2005) berechnet.

$$f_{N,SPV} = \frac{t_{bew Fz}}{t_{bew Bef}} \quad 9-52$$

Dabei sind:

- $f_{N,SPV}$ Faktor zur Berücksichtigung der Nachfragereaktion auf die Qualität [-]
- $t_{bew Fz}$ bewertete Fahrzeit [min]
- $t_{bew Bef}$ bewertete Beförderungszeit [min]

Die bewertete Beförderungszeit ist nach Oetting (2005) in Formel 9-53 dargestellt.

$$t_{bew Bef} = [(t_{Fz} + t_{WF}) \cdot ZB_{WF}] + (t_{WB} \cdot ZB_{WB}) \quad 9-53$$

Dabei sind:

- $t_{bew Bef}$ bewertete Beförderungszeit [min]
- t_{Fz} Regelfahrzeit [min]
- t_{WF} Wartezeiten im Fahrplan [min]
- ZB_{WF} Zeitbewertungsfunktion für Regelfahrzeit und Wartezeiten im Fahrplan [-]
- t_{WB} Wartezeiten im Betrieb [min]
- ZB_{WB} Zeitbewertungsfunktion für Wartezeiten im Betrieb [-]

Da dem Fahrgast die Wartezeiten im Fahrplan vor Antritt der Reise bereits bekannt sind, bewertet er diese wie eine Fahrzeit (Oetting 2005). Daher wird in Formel 9-53 eine gemeinsame Zeitbewertungsfunktion für die Regelfahrzeit sowie die Wartezeiten im Fahrplan angesetzt.

Mit der Definition nach DB Netz AG (2008), dass die Regelbeförderungszeit die Summe aus Regelfahrzeit und ggf. Regelhaltezeit ist, enthält Formel 9-53 alle Zeitanteile der realisierten Beförderungszeit. Damit wird die bewertete Beförderungszeit zur bewerteten realisierten Beförderungszeit $t_{Bef,real,bew}$ und ergibt sich nach Formel 9-54.

$$t_{bew Bef} = t_{Bef,real,bew} = [(t_{Bef,reg} + t_{WF}) \cdot ZB_{WF}] + (t_{WB} \cdot ZB_{WB}) \quad 9-54$$

Dabei sind:

- $t_{bew Bef}$ bewertete Beförderungszeit [min]
- $t_{Bef,real,bew}$ bewertete realisierte Beförderungszeit [min]
- $t_{Bef,reg}$ Regelbeförderungszeit [min]
- t_{WF} Wartezeiten im Fahrplan (aus planmäßigen Synchronisations- und Wartezeiten) [min]
- ZB_{WF} Zeitbewertungsfunktion für planmäßige Beförderungszeit [-]
- t_{WB} Wartezeiten im Betrieb (aus außerplanmäßigen Wartezeiten) [min]
- ZB_{WB} Zeitbewertungsfunktion für Wartezeiten im Betrieb [-]

Da die Wartezeiten im Fahrplan sowohl Fahrzeiten als auch Wartezeiten beinhalten, ist zu hinterfragen, ob der Reisende diese gleich bewertet. Das ist nicht der Fall, da Haltezeiten generell

negativer bewertet werden als Fahrzeiten (Rittner 2012). Enthält ein Fahrplan aufgrund der Anwendung einer Maßnahme mehr Haltezeitanteile als ohne Anwendung der Maßnahme, ist dies also negativer zu bewerten. Rittner (2012) nennt dafür je nach Reiseweite Faktoren zwischen 1,5 und 2,5 (siehe Abbildung 9-1).

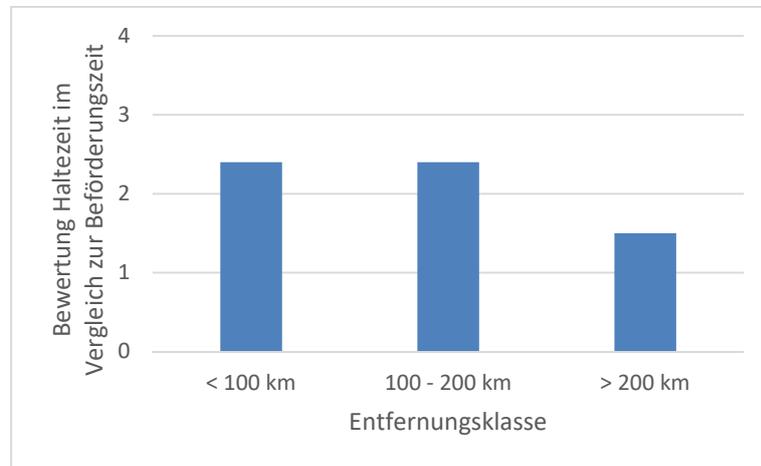


Abbildung 9-1: Bewertung Haltezeiten im Verhältnis zu Fahrzeit und Reiseweite (Rittner 2012)

Um die Auswirkungen einer verlängerten Haltezeit abzubilden, wird Formel 9-54 um eine eigene Bewertungsfunktion für den zusätzlichen Haltezeitanteil der Wartezeiten im Fahrplan ergänzt. Es ergibt sich somit Formel 9-55.

$$t_{Bef,real,bew} = [(t_{Bef,reg} + t_{WF} - \Delta t_{WF,Halt}) \cdot ZB_{WF}] + (\Delta t_{WF,Halt} \cdot ZB_{WF,Halt}) + (t_{WB} \cdot ZB_{WB}) \quad 9-55$$

Dabei sind:

- $t_{Bef,real,bew}$ bewertete realisierte Beförderungszeit [min]
- $t_{Bef,reg}$ Regelbeförderungszeit [min]
- t_{WF} Wartezeiten im Fahrplan (aus planmäßigen Synchronisations- und Wartezeiten) [min]
- $\Delta t_{WF,Halt}$ zusätzlicher Haltezeitanteil der Wartezeiten im Fahrplan [min]
- ZB_{WF} Zeitbewertungsfunktion für planmäßige Beförderungszeit abzüglich des zusätzlichen Haltezeitanteils der Wartezeiten im Fahrplan [-]
- $ZB_{WF,Halt}$ Zeitbewertungsfunktion für den zusätzlichen Haltezeitanteil der Wartezeiten im Fahrplan [-]
- t_{WB} Wartezeiten im Betrieb (aus außerplanmäßigen Wartezeiten) [min]
- ZB_{WB} Zeitbewertungsfunktion für Wartezeiten im Betrieb [-]

In folgenden Fällen gilt $\Delta t_{WF,Halt} = 0$:

- Berechnung der bewerteten Beförderungszeit ohne Anwendung einer Maßnahme
- keine zusätzlichen Haltezeiten aufgrund der Anwendung einer Maßnahme

Es erfolgt somit eine einheitliche Bewertung der Wartezeiten ohne Anwendung einer Maßnahme, obwohl diese aus Fahr- und Haltezeiten bestehen können. Die bestehenden Haltezeitanteile der Wartezeiten ohne Anwendung einer Maßnahme können als Referenzwert für den Wert mit Anwendung einer Maßnahme dienen.

Der Wert mit Anwendung einer Maßnahme beinhaltet Wartezeiten aus Änderungen der Fahrzeit- und/oder Haltezeitanteile. Eine reine Fahrzeitverlängerung wird dem Fahrzeitanteil der Wartezeiten zugerechnet. Der Haltezeitanteil bleibt unverändert.

Werden aufgrund der Anwendung einer Maßnahme zusätzliche Haltezeitanteile generiert, so werden diese mit Formel 9-55 gesondert bewertet. Um eine doppelte Bewertung zu vermeiden, muss $\Delta t_{WF,Halt}$ in der 1. Klammer subtrahiert werden, da dieses Delta Bestandteil von t_{WF} ist. Die Zeitbewertungsfunktion $ZB_{WF,Halt}$ berücksichtigt den zusätzlichen Haltezeitanteil der Wartezeiten durch die Anwendung einer Maßnahme.

Die bewertete Fahrzeit enthält keine Wartezeiten. Somit ergibt sich aus Formel 9-53 ohne Ansatz von Wartezeiten Formel 9-56.

$$t_{bew\ Fz} = t_{Fz} \cdot ZB_{WF} \quad 9-56$$

Dabei sind:

- $t_{bew\ Fz}$ bewertete Fahrzeit [min]
- t_{Fz} Regelfahrzeit [min]
- ZB_{WF} Zeitbewertungsfunktion für Regelfahrzeit [-]

Hier kann ebenfalls die Annahme getroffen werden, dass die Regelfahrzeit der Regelbeförderungszeit entspricht. Somit wird aus der bewerteten Fahrzeit die bewertete Regelbeförderungszeit. Diese ergibt sich nach Formel 9-57.

$$t_{Bef,reg,bew} = t_{Bef,reg} \cdot ZB_{WF} \quad 9-57$$

Dabei sind:

- $t_{Bef,reg,bew}$ bewertete Regelbeförderungszeit [min]
- $t_{Bef,reg}$ Regelbeförderungszeit [min]
- ZB_{WF} Zeitbewertungsfunktion für Regelbeförderungszeit [-]

Da der Fahrgast Wartezeiten im Fahrplan wie eine Beförderungszeit bewertet, wird in Formel 9-57 dieselbe Zeitbewertungsfunktion wie in Formel 9-54 verwendet.

Somit sind Zähler und Nenner der Gleichung 9-52 bekannt und die endgültige Berechnung des Faktors $f_{N,SPV}$ kann nach Formel 9-58 stattfinden.

$$f_{N,SPV} = \frac{t_{Bef,reg,bew}}{t_{Bef,real,bew}} \quad 9-58$$

$$= \frac{t_{Bef,reg} \cdot ZB_{WF}}{\left[(t_{Bef,reg} + t_{WF} - \Delta t_{WF,Halt}) \cdot ZB_{WF} \right] + (\Delta t_{WF,Halt} \cdot ZB_{WF,Halt}) + (t_{WB} \cdot ZB_{WB})}$$

Dabei sind:

- $f_{N,SPV}$ Faktor zur Berücksichtigung der Nachfragereaktion auf die Qualität [-]
- $t_{Bef,reg,bew}$ bewertete Regelbeförderungszeit [min]
- $t_{Bef,real,bew}$ bewertete realisierte Beförderungszeit [min]
- $t_{Bef,reg}$ Regelbeförderungszeit [min]
- ZB_{WF} Zeitbewertungsfunktion für Regelbeförderungszeit sowie planmäßige Beförderungszeit abzüglich des zusätzlichen Haltezeitanteils der Wartezeiten im Fahrplan [-]
- t_{WF} Wartezeiten im Fahrplan (aus planmäßigen Warte- und Synchronisationszeiten) [min]
- $\Delta t_{WF,Halt}$ zusätzlicher Haltezeitanteil der Wartezeiten im Fahrplan [min]
- $ZB_{WF,Halt}$ Zeitbewertungsfunktion für den zusätzlichen Haltezeitanteil der Wartezeiten im Fahrplan [-]
- t_{WB} Wartezeiten im Betrieb (aus außerplanmäßigen Wartezeiten) [min]
- ZB_{WB} Zeitbewertungsfunktion für Wartezeiten im Betrieb [-]

Um Werte für die Zeitbewertungsfunktionen zu erhalten, wurden u. a. durch Walther (1991) und Jochim (1999) empirische Untersuchungen durchgeführt. Für die „Zeit des Befördertwerdens“ wurde ein Zeitbewertungsfaktor von 1,0 ermittelt (Walther 1991). Jochim (1999) nennt für den Schienenpersonenfernverkehr ähnliche Werte (siehe Tabelle 9-9).

Tabelle 9-9: Zuggattungsspezifischer Fahrzeitbewertungsfaktor (Jochim 1999)

Zuggattung	Fahrzeitbewertungsfaktor
ICE	1,021
IC	0,943
EC	0,972
IR	1,032
D	1,018

Da die Werte von Jochim (1999) ebenfalls sehr nah bei 1,0 liegen, wird für die Zeitbewertungsfunktion ZB_{WF} für alle Zuggattungen der Wert 1,0 angesetzt.

Die Werte der Zeitbewertungsfunktionen $ZB_{WF,Halt}$ werden in Abhängigkeit der Reiseweite aus Abbildung 9-1 übernommen und ergeben sich zu: $ZB_{WF,Halt} = \begin{cases} 2,5, & \text{Reiseweite} \leq 200\text{km} \\ 1,5, & \text{Reiseweite} > 200\text{km} \end{cases}$

Für die Zeitbewertungsfunktion ZB_{WB} gibt Jochim (1999) eine Exponentialfunktion (siehe Formel 9-59) an, die abhängig von der Verspätungshöhe ist.

$$VBF(t_{WB}) = A \cdot e^{B \cdot t_{WB}}$$

9-59

Dabei sind:

- $VBF(t_{WB})$ Verspätungsbewertungsfaktor [-]
- A Parameter A für Reisezweck
- B Parameter B für Reisezweck
- t_{WB} Verspätung (Wartezeit im Betrieb) [min]

Da der Faktor abhängig von Reiseweite und Reisezweck ist, unterscheidet Jochim (1999) acht Bewertungsfunktionen. Diese und die zugehörigen Parameter A und B sowie die Anteile der Reisezwecke je Zuggattung sind in Tabelle 9-10 dargestellt.

Tabelle 9-10: Parameter für Verspätungsbewertungsfunktion (Jochim 1999)

Reisezweck	Parameter		Anteile der Reisezwecke je Zuggattung				
	A	B	ICE	IC	EC	IR	D
Dienst nah	1,238	0,0633	0,183	0,093	0,105	0,064	0,054
Dienst weit	1,548	0,0506	0,175	0,089	0,100	0,061	0,052
Pendler nah	1,118	0,0517	0,075	0,119	0,147	0,254	0,271
Pendler weit	1,48	0,0377	0,027	0,043	0,054	0,025	0,026
Privat nah	1,3728	0,0527	0,269	0,164	0,261	0,315	0,293
Privat weit	1,76	0,0413	0,114	0,112	0,110	0,133	0,124
Urlaub nah	1,773	0,0556	0,039	0,069	0,055	0,036	0,044
Urlaub weit	2,19	0,0425	0,118	0,209	0,168	0,111	0,135

Damit kann ein mittlerer, verspätungsabhängiger Verspätungsbewertungsfaktor für die unterschiedlichen Reisezwecke in Abhängigkeit der Zuggattung berechnet werden.

$$VBF_j(t_{WB}) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot e^{B_i \cdot t_{WB}} \cdot RZA_i \quad 9-60$$

Dabei sind:

- $VBF_j(t_{WB})$ Verspätungsbewertungsfaktor für Zuggattung j [-]
- n Anzahl der betrachteten Reisezwecke [-]
- A_i, B_i Parameter A und B für Reisezweck i
- t_{WB} Verspätung (Wartezeit im Betrieb) [min]
- RZA_i Anteil Reisende mit Reisezweck i an der Gesamtzahl der Reisenden [-]

Mit der Funktion ergeben sich für hohe Verspätungen große Faktoren, welche nicht plausibel sind, da z. B. eine 60-minütige Verspätung bei einer Dienstreise gegenüber einer 45-minütigen Verspätung doppelt so hoch gewichtet wird. Daher beschränkt Jochim (1999) die Funktion nach oben und es ergibt sich: $VBF_j(t_{WB}) = \min \left\{ \begin{array}{l} A_i \cdot e^{B_i \cdot t_{WB}} \\ 3,0 \end{array} \right.$

Da die Wartezeiten im Betrieb für Fern- und Nahverkehr unterschiedlich bewertet werden, ergibt sich die Zeitbewertungsfunktion ZB_{WB} zu: $ZB_{WB} = \begin{cases} VBF_j(t_{WB}) & \text{im Fernverkehr} \\ 2,5 & \text{im Nahverkehr} \end{cases}$

Zur Bestimmung der Erlöse im Nahverkehr ist zu beachten, dass bei Nettoverträgen der spezifische Erlös aus Fahrgeldeinnahmen (siehe Formel 9-50) anzusetzen ist. Da angenommen wird, dass im Rahmen der Arbeit lediglich Nettoverträge zur Anwendung kommen, werden die spezifischen Erlöse aus Bestellerverträgen (siehe Formel 9-51) nicht berücksichtigt. Weitere Zahlungen können durch Bonus-/Malus-Regelungen anfallen. Da bezüglich der Regelungen und der Höhe der Zahlungen keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann, werden diese im Rahmen der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Erlöse im Schienengüterverkehr

Nach Oetting (2005) ist die Höhe der Erlöse eines Zuges im Schienengüterverkehr abhängig von folgenden Komponenten:

- Länge der untersuchten Strecke
- Spezifischer Erlös je Kilometer
- Nachfrageänderung je Zug

Der Erlös eines Zuges ist in Formel 9-61 nach Oetting (2005) dargestellt.

$$E_{Zug,SGV} = L_{Abschnitt} \cdot E_{spez,SGV} \cdot m_{Zug,SGV} \cdot f_{N,SGV} \quad 9-61$$

Dabei sind:

- $E_{Zug,SGV}$ Erlös eines Zuges im Schienengüterverkehr [€]
- $L_{Abschnitt}$ Länge des untersuchten Streckenabschnitts [km]
- $E_{spez,SGV}$ spezifischer Erlös je Kilometer [€/tkm]
- $m_{Zug,SGV}$ Masse der Ladung [t]
- $f_{N,SGV}$ Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung aufgrund von Wartezeiten [-]

Um die Erlöse je Kilometer zugscharf abzubilden, sind strecken- und zugspezifische Erlöse je Kilometer erforderlich, „[...] da die Verteilung der Güterarten je Zug und insbesondere die transportierte Menge streckenspezifisch sehr unterschiedlich ausfallen können“ (Oetting 2005). Da eine zugscharfe Abbildung mit umfangreichen Erhebungen und einem hohen Datenaufwand verbunden ist, wird der spezifische Erlös im Schienengüterverkehr analog zum Schienenpersonenverkehr berechnet. Mit Erlösen von 4,417 Mrd. Euro und einer Verkehrsleistung von 98,445 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2015 ergibt sich nach Formel 9-62 dieser Wert (Deutsche Bahn AG 2015).

$$E_{spez,SGV} = \frac{4,417 \text{ Mrd. €}}{98,445 \text{ Mrd. tkm}} = 0,045 \frac{\text{€}}{\text{tkm}} \quad 9-62$$

Dieser Erlös wird für alle Güterzüge verwendet.

Auch hier muss der Faktor $f_{N,SGV}$ ermittelt werden. Jochim (1999) und Oetting (2005) geben an, dass im Schienengüterverkehr eine planmäßige Fahrzeitverlängerung der Verspätung gleichgesetzt wird. Somit werden Fahrzeiten und plan- und außerplanmäßige Wartezeiten gleich bewertet. Damit ergibt sich, dass die Zeitbewertungsfunktionen ZB_{WF} und ZB_{WB} aus Formel 9-58 gleich eins gesetzt werden können. Des Weiteren wird angenommen, dass alle Wartezeiten im Fahrplan gleich bewertet werden. Somit fließen alle Wartezeiten im Fahrplan in den Term t_{WF} ein und der Term $\Delta t_{WF,Halt}$ muss nicht weiter berücksichtigt werden. Es ergibt sich nach Formel 9-63 der Faktor $f_{N,SGV}$.

$$f_{N,SGV} = \frac{t_{Bef,reg}}{t_{Bef,reg} + t_{WF} + t_{WB}} \quad 9-63$$

Dabei sind:

- $f_{N,SGV}$ Faktor zur Berücksichtigung der Nachfragereaktion aufgrund von Wartezeiten [-]
- $t_{Bef,reg}$ Regelbeförderungszeit [min]
- t_{WF} Wartezeiten im Fahrplan (aus planmäßigen Warte- und Synchronisationszeiten) [min]
- t_{WB} Wartezeiten im Betrieb (aus außerplanmäßigen Wartezeiten) [min]

9.4 Nutzen

9.4.1 Einleitung

Mit dem Kriterium *Nutzen* wird die erzielte Schallreduktion bei Anwendung einer Maßnahme monetär bewertet. Dazu wird der Schallpegel unter Berücksichtigung der Maßnahme dem Schallpegel ohne Anwendung einer betrieblichen Maßnahme gegenübergestellt und die Differenz berechnet. Eine Reduktion von 3 dB(A) ist durch den Menschen wahrnehmbar, 10 dB(A) werden als Halbierung des Schallereignisses wahrgenommen (siehe Kapitel 3.2). Die Höhe der Differenz ist dabei von diversen Einflussgrößen abhängig. Neben den beeinflussbaren Größen existieren auch nicht beeinflussbare Größen. Dazu zählen z. B. bereits vorhandene Schallschutzmaßnahmen, die Art des Oberbaus oder Witterungsbedingungen.

9.4.2 Vorgehen

Zur Berechnung des Nutzens wird zunächst der Schalleistungspegel einer Zugfahrt gemäß Schall 03 berechnet. Die Höhe des Pegels ist dabei u. a. abhängig von der Geschwindigkeit, der Anzahl der Wagen und der Art der Wagen. Durch die Anwendung einer Maßnahme wird einer dieser Einflussfaktoren verändert, z. B. wird die Geschwindigkeit um 20 km/h verringert. Aufgrund dieser Verringerung ergibt sich ein neuer Pegel, der, aufgrund der Beibehaltung der übrigen Faktoren, geringer ist, als der Ausgangspegel. Diese Pegeländerung wird mit der Formel zur Berechnung des Nutzens monetär bewertet. Die Berechnung des monetären Nutzens erfolgt für jede Maßnahme, die im Rahmen der Grobbewertung ein positives Gesamtergebnis erzielt hat.

Bei der Verringerung der Geschwindigkeit ist zu beachten, dass die Einwirkzeit erhöht wird, da der Zug langsamer fährt. Es kann also entweder langsamer, leiser und mit einer längeren Einwirkzeit oder aber schneller, lauter und mit einer kürzeren Einwirkzeit gefahren werden. Die Höhe der Reduktion hängt nicht allein von der Verringerung der Geschwindigkeit ab, sondern ebenfalls vom Delta zur Ausgangsgeschwindigkeit. Ist dieses sehr groß, bedeutet dies eine höhere Reduktion gegenüber einem kleineren Delta.

Ebenfalls einen Einfluss auf die Reduktion des Schallpegels hat die Anzahl der Wagen und Achsen in einem Zug (siehe Kapitel 3.2). Viele Wagen und Achsen weisen eine höhere Emission auf als wenige Wagen und Achsen. Des Weiteren ist die Einwirkzeit dementsprechend länger bzw. kürzer. Der Rückschluss, dass das Fahren von kurzen Zügen (= wenig Achsen) besser sei, als das Fahren von langen Zügen (= viele Achsen), ist jedoch nicht richtig. So müsste die Anzahl der Züge entsprechend erhöht werden, um dieselbe Transportmenge in einer bestimmten Zeit zu erreichen. Dies würde dazu führen, dass die Anzahl der Zugfahrten und somit auch die Anzahl der Emissionen zunehmen. Außerdem ist es nicht möglich, entsprechend viele Triebfahrzeuge und Triebfahrzeugführer vorzuhalten, um den Betrieb mit kurzen Zügen zu gewährleisten.

Bei der Berechnung des Nutzens wird auch die Art des Triebfahrzeugs berücksichtigt. Hier weisen E-Loks einen geringeren Schallpegel auf als V-Loks. Dies wird auch bei den Fahrzeugkategorien in der Schall 03 berücksichtigt (BMUB 2014).

9.4.3 Berechnungsformeln

Wie bereits beschrieben, wird zur Berechnung des Nutzens einer Maßnahme die Schallpegelreduktion monetär bewertet. Das BMVI (2016a) hat einen monetären Wert für eine Pegelminderung veröffentlicht. Dieser beträgt 55 Euro je dB(A) Pegelminderung, Einwohner und Jahr (NU). Die Anzahl der Einwohner wird mit der Einsatzlänge und -breite einer Maßnahme sowie der durchschnittlichen Einwohnerdichte Deutschlands berechnet.

Die Einsatzbreite einer Maßnahme wird auf Grundlage des berechneten Schalleistungspegels einer Zugfahrt ermittelt. Mit dem Pegel kann der Abstand zwischen Emissionsort und Immissionsort, für den die in der Schall 03 angegebenen Grenzwerte eingehalten sind, berechnet werden. Durch den Einsatz einer Maßnahmenart wird der Schalleistungspegel, und mit ihm der Abstand von der Gleisachse, reduziert. Es ergeben sich somit 2 Abstände:

- $\Delta L_{\text{Abstand1}}$: Differenz zwischen dem Abstand der Bebauung von der Gleisachse (5 m) und dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert nach Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist
- $\Delta L_{\text{Abstand2}}$: Differenz zwischen dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert vor Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist und dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert nach Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist

In DB Netz AG (2018) sind die Regelzeichnungen zu den Streckenquerschnitten enthalten. Die Querschnittsgestaltung ist u. a. abhängig von der Anzahl der Gleise einer Strecke, der Entwurfsgeschwindigkeit und der Überhöhung. Für einen eingleisigen Streckenquerschnitt auf einem Erdkörper mit einer Entwurfsgeschwindigkeit $v_e \leq 160$ km/h und Schotteroberbau mit einer Überhöhung von $u = 0$ beträgt der Mindestabstand von der Gleismitte zu einer baulichen Anlage 3,30 m. Da in Deutschland neben diesem Streckenquerschnitt weitere Querschnitte existieren und der genannte Wert das Mindestmaß darstellt, wird der Abstand der Bebauung von der Gleisachse mit 5 m angenommen (s. o.).

Die errechnete Schallpegelreduktion wird für den Abstand 1 voll angesetzt (Differenz zum Grenzwert wird reduziert) und für den Abstand 2 halbiert (Grenzwert war bereits vor Anwendung einer Maßnahme eingehalten). Die berechneten Abstände werden mit der durchschnittlichen Einwohnerdichte Deutschlands von 231 Einwohner/km² (Statistisches Bundesamt 2016) und dem Faktor 2 (beide Seiten neben einer Strecke) multipliziert, sodass sich ein Wert mit der Einheit

„Einwohner/km“ ergibt. Dieser Wert wird mit der Einsatzlänge einer Maßnahme eines Zuges (L_{Zug}) multipliziert und ergibt die Anzahl der Einwohner, die durch die Anwendung einer Maßnahme geschützt werden. Durch Multiplikation mit der Schallpegelreduktion (ΔL_{Pegel}) und dem monetären Nutzen nach BMVI (2016a) von 55 Euro je dB(A) Pegelminderung, Einwohner und Jahr (NU) und der Division durch 365 Tage ergibt sich die Einheit „€/ (d•Zug)“ (siehe Formel 9-64).

$$f_{\text{Nutzen}} = -\Delta L_{\text{Pegel}} \cdot E_{\text{Dichte}} \cdot 2 \cdot L_{\text{Zug}} \cdot \text{NU} \cdot \frac{1a}{365d} \cdot \left(\Delta L_{\text{Abstand1}} + \frac{\Delta L_{\text{Abstand2}}}{2} \right) \quad 9-64$$

Dabei sind:

- f_{Nutzen} Kostenkomponente für Schallpegelveränderung [€/ (d•Zug)]
- ΔL_{Pegel} Schallpegelreduktion aufgrund der Maßnahmenanwendung [dB(A)]
- E_{Dichte} durchschnittliche Einwohnerdichte Deutschlands nach Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2017 (= 231 E/km²)
- L_{Zug} Einsatzlänge einer Maßnahme eines Zuges [km/Zug]
- NU monetärer Nutzen nach BMVI 2016a (= 55 €/ (dB(A)•E•Jahr))
- $\Delta L_{\text{Abstand1}}$ Differenz zwischen dem Abstand der Bebauung von der Gleisachse (5 m) und dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert nach Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist [km]
- $\Delta L_{\text{Abstand2}}$ Differenz zwischen dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert vor Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist und dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert nach Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist [km]

Die Verwendung der durchschnittlichen Einwohnerdichte führt zu einer konservativen Annahme hinsichtlich der Einwohner pro Kilometer, da die Dichte in Deutschland nicht gleichmäßig verteilt ist und verkehrlich erschlossene Gebiete dichter besiedelt sind. Der Maßnahmeneffekt für dichter besiedelte Gebiete ist größer. Daher sollte zukünftig die Anwendung von Maßnahmen speziell für diese Gebiete geprüft werden.

Die Differenz zwischen dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert vor Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist und dem Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert nach Anwendung einer Maßnahme eingehalten ist, bezieht sich auf den Grenzwert zum Schutz der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Verkehrsgeräusche nach Schall 03. Dort werden für verschiedene Gebiete Tages- und Nachtwerte unterschieden. Die Nachtwerte sind 10 dB(A) geringer als die Tageswerte. Da ein Großteil der Bebauung in Deutschland aus Kern-, Dorf- oder Mischgebieten besteht und sich die Berechnungen im Rahmen der Arbeit auf den Tag beziehen, wird der entsprechende Wert von 64 dB(A) angesetzt.

Die Kostenkomponente f_{Nutzen} wird für die monetäre Berechnung des Nutzens in Formel 9-65 verwendet.

$$K_{\text{Nutzen}} = f_{\text{Nutzen}} \cdot f_{\text{Pegel}} \cdot n$$

Dabei sind:

- K_{Nutzen} monetärer Wert des Nutzens [€/d]
- f_{Nutzen} Kostenkomponente für Schallpegelveränderung (s.o.) [€/d•Zug]
- f_{Pegel} Faktor zur Berücksichtigung der Schallpegelveränderung [-]
- n Anzahl der Zugfahrten pro Tag [-]

Somit sind für den monetären Wert drei Ausprägungen möglich:

- positiv: Reduzierung des Schallpegels
- negativ: Erhöhung des Schallpegels
- null: gleichbleibender Schallpegel

Um eine höhere Reduktion stärker positiv zu bewerten, gelten für den Faktor f_{Pegel} die in Tabelle 9-11 dargestellten Werte. Nach Tabelle 3-2 wird eine Pegelveränderung von 3 dB(A) durch den Menschen kaum wahrgenommen. Daher beträgt der Faktor bis zu diesem Wert 1,0. Der Mensch nimmt eine Pegeländerung zwischen 3 und 6 dB(A) wahr, was sich in dem Faktor 1,5 widerspiegelt. Eine spürbare Veränderung der Wahrnehmung tritt ab 6 dB(A) ein. Der Faktor beträgt deshalb 1,75. Eine Pegeländerung von 10 dB(A) wird als Verdoppelung bzw. Halbierung wahrgenommen, was sich in dem Faktor von 2,0 ausdrückt. Die Werte der Schallreduktion werden dabei auf 0,1 dB(A) ab- bzw. aufgerundet.

Tabelle 9-11: Faktor zur Berücksichtigung der Schallpegelveränderung (eigene Darstellung)

Reduktion [dB(A)]	f_{Pegel} [-]
< 3,0	1,0
≥ 3,0 < 6,0	1,5
≥ 6,0 < 10,0	1,75
≥ 10,0	2,0

9.4.4 Beispiele

Zur Verständlichkeit werden für zwei Maßnahmen die monetären Werte des Nutzens beispielhaft berechnet.

Beschleunigen – geringere Beschleunigung

Durch eine Verringerung der Anfahrzugkraft um z. B. 50 % wird die Beschleunigungsphase auf eine Zielgeschwindigkeit verlängert. Die Angabe einer konstanten Schallpegelminderung ist nicht möglich, da sich diese aufgrund der Beschleunigung ändert. Daher werden in 5 km/h-Schritten die Schallpegel mit 100 % Anfahrzugkraft und die Schallpegel mit verminderter Anfahrzugkraft berechnet und in einem Diagramm aufgetragen. Für beide Verläufe wurde eine polynomische Trendlinie 4. Grades berechnet. Diese wurden jeweils integriert, sodass mit Grenzwerten (Beginn und Ende der

Beschleunigungsphase) die Flächen unterhalb der Graphen (siehe Abbildung 9-2) berechnet werden konnten. Durch Subtraktion der Flächen wurde die Schallpegelminderung der kompletten Beschleunigungsphase gegenüber der Anfahrzugkraft mit 100 % berechnet. Diese beträgt 3,55 dB(A)•km für eine Beschleunigung auf 80 km/h mit einer Anfahrzugkraft von 50 % auf einer Länge von 3,2 Kilometern. Daraus ergibt sich eine Schallpegelminderung von 1,10 dB(A).

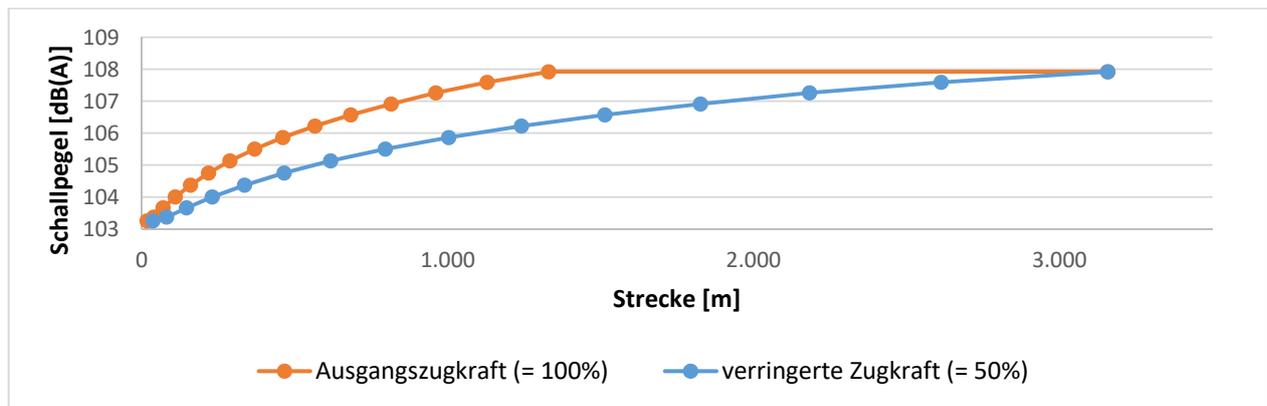


Abbildung 9-2: Gegenüberstellung der Graphen für Ausgangszugkraft und verringerte Zugkraft (eigene Darstellung)

Zur Berechnung der Abstände wurden die Schallpegel der Ausgangsgeschwindigkeit (hier 80 km/h) und der, aufgrund der geringeren Anfahrzugkraft von 50 %, verringerten Zielgeschwindigkeit (hier 41 km/h) berechnet und die Abstände gegenübergestellt. Somit kann der Abstand von der Gleisachse von 37 auf 27 m verringert werden.

Da sich die Schallpegelminderung auf einen konkreten Abstand bezieht und die Verringerung des Abstandes von der Gleisachse davon abhängig ist, kann dieser nicht voll angesetzt werden. Daher wird in diesem Fall die Verringerung durch zwei dividiert und der Wert für die komplette Einsatzlänge angesetzt. Die Einsatzlänge der Maßnahme eines Zuges entspricht der Länge der Beschleunigungsphase mit 50 % Anfahrzugkraft und beträgt 3,2 Kilometer. Somit berechnet sich der Faktor f_{Nutzen} nach Formel 9-66.

$$f_{\text{Nutzen}} = \frac{-\Delta L_{\text{Pegel}}}{2} \cdot E_{\text{Dichte}} \cdot 2 \cdot L_{\text{Zug}} \cdot NU \cdot \frac{1a}{365d} \cdot \left(L_{\text{Abstand1}} + \frac{L_{\text{Abstand2}}}{2} \right)$$

$$f_{\text{Nutzen}} = -\frac{(-1,10\text{dB(A)})}{2} \cdot 231 \frac{E}{\text{km}^2} \cdot 2 \cdot 3,2\text{km} \cdot \frac{55\text{€}}{\text{dB(A)} \cdot E \cdot \text{Jahr}} \cdot \left(27\text{m} - 5\text{m} + \frac{37\text{m} - 27\text{m}}{2} \right) = 3,30 \frac{\text{€}}{d \cdot \text{Zug}} \quad 9-66$$

Mit Formel 9-67 wird der monetäre Wert des Nutzens der Maßnahme berechnet. Die Zugzahl ergibt sich bei Anwendung der Maßnahme (siehe Anlage 13).

$$K_{\text{Nutzen}} = f_{\text{Nutzen}} \cdot f_{\text{Pegel}} \cdot n$$

$$K_{\text{Nutzen}} = 3,30 \frac{\text{€}}{d \cdot \text{Zug}} \cdot 1,0 \cdot 43,2 \text{ Züge am Tag} = 142,60\text{€/d} \quad 9-67$$

Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})

Durch eine Geschwindigkeitsverringerung von z. B. 100 auf 70 km/h ergibt sich eine Schallpegelminderung von 1,90 dB(A). Aufgrund dieser Minderung kann der Abstand von der Gleisachse, für den der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, von 44 auf 34 m reduziert werden. Die Einsatzlänge der Maßnahme betrage 50 km. Somit wird der Faktor f_{Nutzen} nach Formel 9-68 berechnet.

$$f_{\text{Nutzen}} = -\Delta L_{\text{Pegel}} \cdot E_{\text{Dichte}} \cdot 2 \cdot L_{\text{Zug}} \cdot NU \cdot \frac{1a}{365d} \cdot \left(L_{\text{Abstand1}} + \frac{L_{\text{Abstand2}}}{2} \right)$$
$$f_{\text{Nutzen}} = -(-1,90\text{dB(A)}) \cdot 231 \frac{E}{\text{km}^2} \cdot 2 \cdot 50\text{km} \cdot \frac{55\text{€}}{\text{dB(A)} \cdot E \cdot \text{Jahr}} \cdot \left((34\text{m} - 5\text{m} + \frac{44\text{m} - 34\text{m}}{2}) \right) = 224,90 \frac{\text{€}}{d \cdot \text{Zug}} \quad 9-68$$

Mit Formel 9-69 wird der monetäre Wert des Nutzens der Maßnahme berechnet. Die Zugzahl ergibt sich bei Anwendung der Maßnahme (siehe Anlage 14).

$$K_{\text{Nutzen}} = f_{\text{Nutzen}} \cdot f_{\text{Pegel}} \cdot n$$
$$K_{\text{Nutzen}} = 224,86 \frac{\text{€}}{d \cdot \text{Zug}} \cdot 1,0 \cdot 31,4 \text{ Züge am Tag} = 7.061,90\text{€/d} \quad 9-69$$

Das Ergebnis der monetären Berechnung des Nutzens hängt u. a. von den in Tabelle 9-11 dargestellten Faktoren zur Berücksichtigung der Schallpegelveränderung ab. Die Faktoren wurden so gewählt, dass eine hohe Veränderung mit einem großen Faktor hinterlegt ist. Da die Faktoren den Wert ≥ 1 annehmen, wird der monetäre Wert des Nutzens zu groß und daher wahrscheinlich überschätzt. Die Faktoren sollten daher in zukünftigen Arbeiten validiert werden.

9.5 Umsetzbarkeit

Wie in der Grobbewertung und im Steckbrief bereits erwähnt, erfolgt die Bewertung der Umsetzbarkeit in zwei Stufen:

1. Ist eine Maßnahmenart uneingeschränkt umsetzbar/machbar?
2. Wie lange dauert die Umsetzung der Maßnahmenart?

Die Grobbewertung hat für die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten die in Tabelle 9-12 dargestellten Bewertungen der o.g. Stufen ergeben. Dabei kennzeichnet ein „+“, dass die entsprechende Maßnahmenart uneingeschränkt umsetzbar/machbar ist bzw. die Umsetzungsdauer weniger als 5 Jahre beträgt. Ein „-“ wurde für die Maßnahmenarten vergeben, die nicht uneingeschränkt umsetzbar/machbar sind bzw. deren Umsetzungsdauer mehr als 5 Jahre beträgt.

Tabelle 9-12: Umsetzbarkeit der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten

Oberpunkt	Unterpunkt	Maßnahmenart	Frage	
			1	2
Änderung des Wagenzugs	Art der Wagen	nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen	+	-
Fahrzeitveränderung	Beschleunigen	geringere Beschleunigung	+	+
		geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})	+	+
	Beharren	Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen	+	+
		geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})	+	+
	Auslaufen	Auslaufen nutzen	+	+
	Bremsen	geringere Beschleunigung	+	+
	Geschwindigkeitsprofil	schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)	-	-
		Weiterentwicklung der Zuglaufregelung	-	-
Umleitung		Umfahren von Lärmhotspots	-	-

Generell müssen für alle genannten Maßnahmenarten Investitionen getätigt werden. Eine Berechnung der genauen Höhe der Investitionskosten erfolgt im Rahmen der Arbeit aus zwei Gründen nicht. Zum einen werden die o. g. Maßnahmenarten bisher nicht zur Schallreduktion eingesetzt. Zum anderen liegen keine Daten diesbezüglich vor. Es erfolgt daher, aufgrund der nachfolgenden Erläuterungen, keine monetäre Bewertung der Umsetzbarkeit.

Zurzeit findet eine Umrüstung der Güterwagen von GG- auf LL-Sohle statt. Je mehr Wagen umgerüstet sind, desto wirtschaftlicher kann die Maßnahmenart hinsichtlich des Einsatzes von leisen und neuen Wagen eingesetzt werden. Aufgrund der Vielzahl von Wagenhaltern in Europa kann bezüglich der Dauer bis zur Umsetzung keine Aussage getroffen werden. Die Deutsche Bahn AG gibt an, dass bis zum Jahr 2020 alle Bestandsgüterwagen umgerüstet sind (DB Umweltzentrum 2014).

Bis auf die Maßnahmenarten bezüglich des Geschwindigkeitsprofils können die übrigen Maßnahmenarten zur Fahrzeitveränderung (bis auf Auslaufen) und das Umfahren von Lärmhotspots bereits heute eingesetzt werden. Die entsprechende Software zur Fahrplanerstellung ist beim EIU vorhanden, sodass diese im alltäglichen Geschäft und im Rahmen der regulären Tätigkeiten der Mitarbeiter eingesetzt werden können. Daher ergibt sich diesbezüglich kein Mehraufwand.

Weiterhin ist der Einsatz der Maßnahmenart „Weiterentwicklung der Zuglaufregelung“ mit einer langen Umsetzungsdauer verbunden. Dies betrifft die Programmierung, Implementierung und den Test von Algorithmen zur Schallreduktion. Die Dauer bis zur Umsetzung beträgt fünf Jahre (Griese 22.08.2017).

9.6 Kombinationsmöglichkeiten

Unter den weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten bestehen Kombinationsmöglichkeiten. Diese sind in Tabelle 9-13 dargestellt. Die Nummern stellen dabei die jeweiligen Maßnahmenarten aus Tabelle 8-1 dar.

Tabelle 9-13: Kombinationsmöglichkeiten der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten (eigene Darstellung)

Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		j	j	j	j	j	j	j	j	j
2	j		j	j	j	j	j	j	j	j
3	j	j		n	j	j	j	j	j	j
4	j	j	n		n	j	j	j	j	j
5	j	j	j	n		j	j	j	j	j
6	j	j	j	j	j		j	j	j	j
7	j	j	j	j	j	j		j	j	j
8	j	j	j	j	j	j	j		j	j
9	j	j	j	j	j	j	j	j		j
10	j	j	j	j	j	j	j	j	j	

Die Lesart der Tabelle 9-13 wird im Folgenden an einem Beispiel verdeutlicht: Maßnahmenart 2 („geringere Beschleunigung“, siehe Tabelle 8-1) ist mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar (3. Zeile von oben, positive Bewertung „j“). Ebenso kann bei allen anderen Maßnahmenarten auch die Maßnahme 2 angewendet werden (3. Spalte von links).

Da sich die Maßnahmenart 3 („Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“) mit der Maßnahmenart 4 („Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen“) widerspricht, können diese nicht miteinander kombiniert werden und erhalten eine negative Bewertung („n“). Gleiches gilt für die Kombination der Maßnahmenart 4 mit Maßnahmenart 5 („Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“).

Die übrigen Maßnahmenarten sind miteinander kombinierbar.

Da die Tabelle überwiegend positive Bewertungen enthält und die negativen Bewertungen selbsterklärend sind, wird keine monetäre Bewertung der Kombinationsmöglichkeiten vorgenommen. Dies ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Kriterien *Kosten*, *betriebliche Wirkung* und *Nutzen* einen höheren Stellenwert im Rahmen der wirtschaftlichen Betrachtung aufweisen als die Bewertung der Kombinierbarkeit von Maßnahmenarten.

Die Tabelle 9-13 ist bedingt in der Lage, eine Aussage zur Kombinierbarkeit von mehr als zwei Maßnahmen (n-m-Beziehung) darzustellen, was auch nicht Teil der Arbeit ist.

9.7 Zusammenfassung

Mit dem in diesem Kapitel beschriebenen Schema zur detaillierten Bewertung, der Unterteilung in verschiedene Kriterien und der Angabe von allgemeingültigen Formeln zur Berechnung können die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten monetär bewertet werden. Die Formeln berücksichtigen neben den relevanten Kostenarten (siehe Kapitel 3.10) auch die Auswirkungen auf den Betrieb und den Nutzen. Sie können für jede Maßnahmenart mit den jeweiligen Einflussgrößen zur Berechnung bei Umsetzung einer Maßnahmenart genutzt werden. Um die detaillierte Bewertung durchführen zu können, werden zunächst die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten und deren Maßnahmen beschrieben (siehe folgendes Kapitel).



10 Detaillierte Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten

10.1 Einleitung

In Kapitel 7 wurden die ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten beschrieben und darauf aufbauend die Grobbewertung durchgeführt (siehe Kapitel 8). Da nur die Maßnahmenarten mit positiver Bewertung weiter untersucht werden, konnte die Anzahl auf 10 reduziert werden (siehe Tabelle 10-1). Diese werden nun detailliert beschrieben (Kapitel 10) sowie bewertet (Kapitel 11).

Tabelle 10-1: Übersicht über die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten

Oberpunkt	Unterpunkt	Maßnahmenart	Nr.
Änderung des Wagenzuges	Art der Wagen	nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen	1
		geringere Beschleunigung	2
Fahrzeitveränderung	Beschleunigen	geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})	3
		Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen	4
	Beharren	geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})	5
		Auslaufen	Auslaufen nutzen
	Bremsen	geringere Beschleunigung	7
	Geschwindigkeitsprofil	schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)	8
		Weiterentwicklung der Zuglaufregelung	9
	Umleitung	Umfahren von Lärmhotspots	10

Die detaillierte Beschreibung umfasst dabei die Verwendung der in Kapitel 9 dargestellten Formeln. Mit diesen erfolgt u. a. die Berechnung der Veränderung der Kosten bei Einsatz einer Maßnahmenart. Für jede Maßnahmenart wird die jeweilige charakteristische Einflussgröße variiert, um deren Sensitivität abzubilden. Als Ergebnis der Analyse ist eine Aussage hinsichtlich Kosten und Nutzen einer Maßnahmenart möglich.

Dazu werden zunächst eine Beispielstrecke und ein Betriebsprogramm beschrieben. Daraus werden u. a. Mindestzugfolgezeiten berechnet, welche bei der monetären Bewertung der betrieblichen Wirkung benötigt werden. Durch den Einsatz einer Maßnahme ergeben sich z. B. Änderungen bezüglich der Fahrzeit eines Zuges. Diese Änderungen werden bei der Berechnung der Kosten einbezogen. Für jede untersuchte Maßnahmenart wurde die jeweilige Einflussgröße variiert und mit der Schall 03 deren Schallleistungspegel berechnet. Anschließend erfolgt die monetäre Bewertung des Nutzens bei Einsatz der jeweiligen Maßnahmenart.

10.2 Einflussgrößen

10.2.1 Beispielstrecke und Betriebsprogramm

Die Maßnahmenarten werden auf einer fiktiven zweigleisigen Beispielstrecke mit einer Gesamtlänge von 50 km (siehe Abbildung 10-1) eingesetzt. Da die Maßnahmen im Schienengüterverkehr angewendet und die Auswirkung auf den Schienenpersonenverkehr ebenfalls betrachtet werden, wird eine Mischverkehrsstrecke (Streckenstandard M 160 der Deutschen Bahn AG) gewählt. Die Stellwerkstechnik wird mit nichtmechanischen Stellwerken angenommen. Die Blockabschnittslänge von 3 km und der Abstand der Überholungsbahnhöfe von 10 km, von denen jeder Zweite genutzt wird, wurden aus den Standardelementen gemäß DB Netz AG (2009b) übernommen. Als Zugsicherungssystem wird die punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) eingesetzt (siehe ebenfalls DB Netz AG (2009b)).

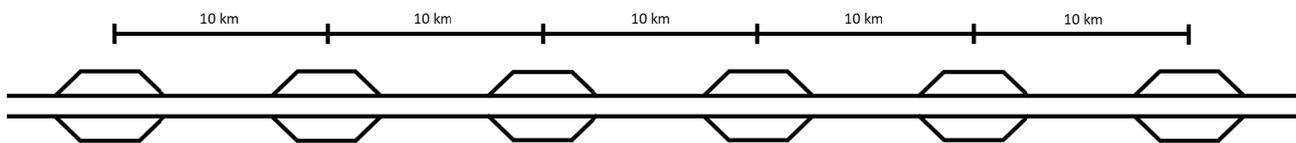


Abbildung 10-1: Beispielstrecke (DB Netz AG 2009b)

Mit dem Streckenstandard M 160 werden Zugzahlen pro Tag und Richtung definiert. Auf der Strecke verkehren 150 Züge pro Tag und Richtung. Die Maßnahmenarten werden für die 60 verkehrenden Güterzüge eingesetzt. Weitere Einflussgrößen zur Berechnung der Fahr- und Mindestzugfolgezeiten sind in Tabelle 10-2 dargestellt.

Tabelle 10-2: Einflussgrößen zur Berechnung der Fahr- und Mindestzugfolgezeiten

	SPFV	SPNV	SGV
Zugzahl pro Tag und Richtung [-]	50	40	60
Zuggattung [-]	IC/EC	RB/RE	Ganzzug
Rang [-]	4	10	14
Mittlere Einbruchsverspätung \bar{t}_{VE} [min]	30		
Wahrscheinlichkeit p_{VE} für das Auftreten einer Einbruchsverspätung [-]	0,5	0,6	
Zuglänge [m]	200	150	720
Bremsbeschleunigung [m/s ²]	0,7		0,35
Baureihe Triebfahrzeug [-]	101	146	185
Widerstandsbeiwert b für vierachsige Wagen [-]	0,0025		
Äquivalentsquerschnittsfläche f aus Windkanalversuchen für vierachsige Wagen [-]	1,45		
Widerstandsbeiwert c_0 für Wälzlager [-]			1,2
Widerstandsbeiwert c_1 für gemischte Güterwagen [-]			0,05
Zugmasse [t]	465	330	2.240
Wagenzugmasse [t]	385	250	2.160
Masse je Wagen [t]	55	50	60
Wagenanzahl [-]	7	5	36
Wagenart [-]	Reisewagen	Dosto-Wagen	gemischt
Massefaktor [-]	1,075		1,065
v_{max} [km/h]	160	140	100

Die Werte der mittleren Einbruchsverspätung für die verschiedenen Zugarten sind in der Richtlinie 405.0204 (gültig ab 01.01.2008) festgelegt. Zunächst sind diese Werte, aufgrund des Alters der Richtlinie und dem Hinweis, dass eine Aktualisierung der Werte vorgesehen ist, in Frage zu stellen. Des Weiteren werden die Maßnahmenarten auf den Schienengüterverkehr angewendet, sodass die Annahme eines höheren Mittelwertes die sichere Seite abbildet. Aus den genannten Gründen wird nicht zwischen den verschiedenen Zugarten unterschieden und daher ein Wert für die mittlere Einbruchsverspätung von 30 Minuten angenommen.

Die Zuggattungen orientieren sich ebenfalls am Streckenstandard M 160. Für die Triebfahrzeuge wurden zuggattungstypische Baureihen gewählt. Für die Wagenarten des Schienenpersonenverkehrs wurden Wagen mit Scheibenbremsen angenommen. Die Güterzüge bestehen aus gemischten (gedeckte und offene) Wagen und besitzen, je nach Modellzug, Grauguss- oder Verbundstoff-Klotzbremsen. Die Anzahl von 36 Wagen entspricht einem 720 m-Wagenzug. Im Rahmen der

Maßnahmenarten werden auch 360 m-Wagenzüge (18 Wagen) betrachtet. Dies entspricht einer Halbierung eines langen Zuges. Die Masse eines Zuges ergibt sich nach Formel 10-1. Dabei wird mit dem Faktor $f_{\text{Auslastung}}$ die Auslastung eines Zuges berücksichtigt.

$$m_{\text{Wagen}} = f_{\text{Radsatzlast}} \cdot n_{\text{Achsen}} \cdot n_{\text{Wagen}} \cdot f_{\text{Auslastung}} = 22,5t \cdot 4 \cdot 36 \cdot \frac{2}{3} = 2.160t \quad 10-1$$

Dabei sind:

- m_{Wagen} Wagenzugmasse [t]
- $f_{\text{Radsatzlast}}$ Faktor zur Berücksichtigung der Radsatzlast (= 22,5 t)
- n_{Achsen} Anzahl der Achsen je Wagen (= 4) [-]
- n_{Wagen} Anzahl der Wagen im Zug (= 36) [-]
- $f_{\text{Auslastung}}$ Faktor zur Berücksichtigung der Auslastung eines Zuges (= 2/3) [-]

Des Weiteren sind die Höchstgeschwindigkeiten der Züge gegeben. Mit diesen erfolgen die Berechnungen der Fahrzeiten (siehe Tabelle 10-3) mit einem am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik entwickelten Tool (siehe Abbildung 10-2). Dem Tool liegt das Δv -Schritt-Verfahren zu Grunde. Die maximale Geschwindigkeit für einzelne Streckenabschnitte wird dabei in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit des Zuges, der Streckenhöchstgeschwindigkeit und der bestehenden Widerstände ermittelt. Anschließend werden die einzelnen Streckenabschnitte gleichzeitig von Anfang und Ende berechnet, also werden Beschleunigungs- und Bremsphase zeitgleich von der Streckenlänge abgezogen, bis entweder keine Beschleunigung mehr möglich ist (und die verbleibende Strecke somit mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden kann) oder die gesamte Strecke befahren wurde. Durch diese Berechnungsweise ist bereits bei der Berechnung der Beschleunigungsphase sichergestellt, dass die berechnete Höchstgeschwindigkeit auch tatsächlich gefahren werden kann. Dabei wird angenommen, dass alle Züge eine behinderungsfreie Fahrt ohne Halt in den Überholungsbahnhöfen absolvieren. Für die Berechnung der Mindestzugfolgezeiten (s. u.) wurden die Überholungsbahnhöfe berücksichtigt.

Tabelle 10-3: Höchstgeschwindigkeiten und Ausgangsfahrzeiten

	v_{max} [km/h]	t [min]
SPFV	160	19,50
SPNV	140	22,07
SGV	100	31,50

Zugdaten

enter

Länge m

Bremsbesch. m/s²

v Start km/h

v Ende km/h

Bremse

Traktion

Güterwagen

c0

c1

Masse t

Massefaktor

v max km/h

Streckendaten

Beispiel

Nr.	Länge	v max	Neigung
1	50000 m	160 km/h	0 ‰

Abbildung 10-2: Screenshot des Tools zur Berechnung der Fahrzeit (Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik 2015)

Da die veränderte Fahrzeit und die mittlere Folgeverspätung wesentliche Einflussgrößen für die Formeln zur Kostenberechnung darstellen, werden für das Betriebsprogramm zunächst die mittleren Folgeverspätungen für alle Variationen der Anfahrzugkraft, der Geschwindigkeit und der Bremskraft infolge der Maßnahmenarten 2 bis 11 (siehe Tabelle 10-1) berechnet. Dazu werden die mittleren Mindestzugfolgezeiten \bar{z} , \bar{z}_g und \bar{z}_v sowie die mittlere Pufferzeit \bar{t}_p berechnet.

Da bei der Maßnahmenart 1 keine Variation der Anfahrzugkraft, der Geschwindigkeit oder der Bremskraft erfolgt, entfällt für diese Maßnahmenart die Berechnung der genannten Zeiten.

10.2.2 Berechnung der mittleren Mindestzugfolgezeiten und Pufferzeit

Mittlere Mindestzugfolgezeit

Da kein Fahrplan vorliegt, wird anhand eines fahrplanunabhängigen Verfahrens die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Zugfolgefälle nach Formel 10-2 berechnet (Potthoff 1968).

$$p_{ij} = p_i \cdot p_j = \frac{n_i \cdot n_j}{n^2} \quad 10-2$$

Dabei sind:

- p_{ij} Wahrscheinlichkeit des Zugfolgefalls $i - j$ [-]
- p_i, p_j Wahrscheinlichkeit (rel. Häufigkeit) für das Auftreten eines Zuges i bzw. j mit $p_i = n_i/n$ bzw. $p_j = n_j/n$ [-]
- n_i, n_j Anzahl des Auftretens des Zuges i bzw. j im Betriebsprogramm [-]
- n Gesamtanzahl der Züge [-]

Somit ergeben sich die in Tabelle 10-4 dargestellten Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Zugfolgefälle für die in Tabelle 10-2 dargestellten Zugzahlen.

Tabelle 10-4: Wahrscheinlichkeiten der Zugfolgefälle

p_{ij}	SPFV	SPNV	SGV
SPFV	0,1111	0,0889	0,1333
SPNV	0,0889	0,0711	0,1067
SGV	0,1333	0,1067	0,1600

Die Mindestzugfolgezeiten aller möglichen Zugfolgefälle wurden mit dem Programm „Streckenmodell MOSES (Version 4.1)“ der BVU (2012) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10-5 dargestellt.

Tabelle 10-5: Mindestzugfolgezeiten aller möglichen Zugfolgefälle

z_{ij}	SPFV [min]	SPNV [min]	SGV [min]
SPFV [min]	2,116	2,116	2,116
SPNV [min]	3,381	2,32	2,32
SGV [min]	7,997	7,200	3,500

Die mittlere Mindestzugfolgezeit ergibt sich nach Formel 10-3 (Potthoff 1968).

$$\bar{z} = \sum_i \sum_j p_{ij} \cdot z_{ij} \quad 10-3$$

Dabei sind:

- \bar{z} mittlere Mindestzugfolgezeit [min]
- p_{ij} Wahrscheinlichkeit des Zugfolgefalls $i - j$ [-]
- z_{ij} Mindestzugfolgezeit des Zugfolgefalls $i - j$ [min]

Die mittlere Mindestzugfolgezeit für die o. g. Wahrscheinlichkeiten und Mindestzugfolgezeiten beträgt 3,81 min.

Mittlere Mindestzugfolgezeit für gleichrangige und verschiedenrangige Zugfolgefälle

Die Berechnung der mittleren Mindestzugfolgefälle für gleichrangige (\bar{z}_g) und verschiedenrangige (\bar{z}_v) Zugfolgefälle erfolgt nach Schwanhäußer (1974). Dazu müssen die Anzahlen der gleichrangigen und verschiedenrangigen Zugfolgefälle ermittelt werden. Die jeweilige Anzahl ergibt sich durch eine Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten mit der Summe aller Züge nach Formel 10-4.

$$\text{Anzahl Zugfolgefälle} = p_{ij} \cdot n_z \quad 10-4$$

Dabei sind:

- p_{ij} Wahrscheinlichkeit des Zugfolgefalls $i - j$ [-]
- n_z Gesamtanzahl aller Züge [-]

In Tabelle 10-6 sind die einzelnen Anzahlen der Zugfolgefälle dargestellt. Die grün markierten Zellen stellen die gleichrangigen Zugfolgefälle dar. Die übrigen Zugfolgefälle sind verschiedenrangig.

Tabelle 10-6: Anzahlen aller möglichen Zugfolgefälle

	SPFV	SPNV	SGV
SPFV	16,67	13,33	20,00
SPNV	13,33	10,67	16,00
SGV	20,00	16,00	24,00

Aus der Multiplikation der einzelnen Anzahlen mit den jeweiligen Mindestzugfolgezeiten ergeben sich nach Formel 10-5 die in Tabelle 10-7 dargestellten Summen der Mindestzugfolgezeiten.

$$\sum z_{ij} = \text{Anzahl Zugfolgefälle} \cdot z_{ij} \quad 10-5$$

Dabei sind:

- Σz_{ij} Summe der Mindestzugfolgezeiten [min]
- z_{ij} Mindestzugfolgezeit des Zugfolgefalls i – j [min]

Tabelle 10-7: Summen der Mindestzugfolgezeiten über die Anzahl aller möglichen Zugfolgefälle

	SPFV [min]	SPNV [min]	SGV [min]
SPFV [min]	35,27	28,21	42,32
SPNV [min]	45,08	24,75	37,12
SGV [min]	159,94	115,20	84,00

Mittlere Mindestzugfolgezeit für gleichrangige Zugfolgefälle

$$\bar{z}_g = \frac{\sum z_{ij, \text{gleichrangig}}}{\text{Anzahl gleichrangige Zugfolgefälle}} = \frac{35,27 + 24,75 + 84,00}{16,67 + 10,67 + 24,00} = 2,81 \text{ min}$$

Mittlere Mindestzugfolgezeit für verschiedenrangige Zugfolgefälle

$$\bar{z}_v = \frac{\sum z_{ij, \text{verschiedenrangig}}}{\text{Anzahl verschiedenrangige Zugfolgefälle}} = \frac{28,21 + 42,32 + 45,08 + 37,12 + 159,94 + 115,20}{13,33 + 20,00 + 13,33 + 16,00 + 20,00 + 16,00} = 4,34 \text{ min}$$

Mittlere Pufferzeit

Die mittlere Pufferzeit berechnet sich nach Formel 10-6 (Potthoff 1968).

$$\bar{t}_p = \frac{T_U}{n} - \bar{z} = \frac{1.440 \text{ min}}{150} - 3,81 \text{ min} = 5,79 \text{ min} \quad 10-6$$

Dabei sind:

- \bar{t}_p mittlere Pufferzeit [min]
- T_U Untersuchungszeitraum (= 1.440 min)
- n Gesamtanzahl aller Züge [-]
- \bar{z} mittlere Mindestzugfolgezeit [min]

Mittlere Folgeverspätung aus Einfädeln und Kreuzen

Die Berechnung der mittleren Folgeverspätung aus Einfädeln und Kreuzen erfolgt nach Schwanhäuser (1974) mit Formel 10-7 und ergibt für o. g. Wahrscheinlichkeiten und Zeiten einen Wert von 1,40 min.

$$t_{Wm} = \left(p_{VE} - \frac{p_{VE}^2}{2} \right) \cdot \frac{\bar{t}_{VE}^2}{\bar{t}_p + \bar{t}_{VE} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\bar{z}}{\bar{t}_{VE}}} \right)} \cdot \left[p_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{\bar{z}_g}{\bar{t}_{VE}}} \right)^2 + (1 - p_g) \cdot \frac{\bar{z}_V}{\bar{t}_{VE}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2\bar{z}_V}{\bar{t}_{VE}}} \right) + \frac{\bar{z}}{\bar{t}_p} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\bar{z}}{\bar{t}_{VE}}} \right)^2 \right] \quad 10-7$$

Dabei sind:

- t_{Wm} mittlere Folgeverspätung aus Einfädeln und Kreuzen [min]
- p_{VE} Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Einbruchsverspätung [-]
- \bar{t}_{VE} mittlere Einbruchsverspätung [min]
- \bar{t}_p mittlere Pufferzeit [min]
- \bar{z} mittlere Mindestzugfolgezeit [min]
- p_g Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines gleichrangigen Zugfolgefalls [-]
- \bar{z}_g mittlere Mindestzugfolgezeit der gleichrangigen Zugfolgefälle [min]
- \bar{z}_V mittlere Mindestzugfolgezeit der verschiedenrangigen Zugfolgefälle [min]

Mit den genannten Formeln wurden die in Anlage 11 dargestellten mittleren Mindestzugfolgezeiten, mittleren Folgeverspätungen aus Einfädeln und Kreuzen und die Nennleistungen für die jeweiligen Maßnahmen berechnet.

Mit dem Streckenstandard M 160 werden Zugzahlen pro Tag und Richtung definiert (siehe Tabelle 10-2). Um das Verhältnis zwischen den verschiedenen Zugzahlen beizubehalten und gleichzeitig die Nennleistung nach Formel 9-45 mit dem Qualitätsfaktor $q_0 = 1,0$ zu erreichen, wurden die Zugzahlen proportional angepasst. Sollte nach Anwendung einer Maßnahme die Nennleistung überschritten werden, so wurde die Anzahl der Güterzüge solange verringert, bis die Nennleistung größer oder gleich der Gesamtsumme der Zugfahrten ist.

Da zunächst die Zugzahlen proportional angepasst wurden und nach Anwendung einer Maßnahme nur die Anzahl der Güterzüge angepasst wird, kann der Fall eintreten, dass nach Anwendung einer

Maßnahme die Anzahl der Güterzüge erhöht werden könnte und die Nennleistung weiterhin erreicht wird. Dies ist nicht plausibel, da sich für alle Maßnahmenarten, außer der Maßnahmenart „Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen“, eine Änderung der Beförderungszeit (s. u.) von größer Null einstellt. Die Durchführung von Zugfahrten wird also unattraktiver, was keine Erhöhung der Zugzahlen zur Folge haben kann. In diesem Fall wurde die Anzahl der Güterzüge vor Anwendung einer Maßnahme beibehalten.

Die berechnete mittlere Folgeverspätung entspricht der Wartezeit im Betrieb (Schwanhäußer 1974).

Zur Berechnung der Kostenänderungen sind für den Schienengüterverkehr die Wartezeiten im Fahrplan und für den Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr die Änderung der Wartezeiten im Betrieb zu berücksichtigen.

Aus den dargestellten Formeln in diesem Kapitel und in Kapitel 9.3 wurden die Formeln 10-8 und 10-9 entwickelt. Mit diesen werden die Berechnungen der Änderung der Beförderungszeit und die veränderte Wartezeit im Betrieb durchgeführt.

$$\Delta t_{Bef} = \Delta t_{WF} + \Delta t_{WB} \quad 10-8$$

$$\Delta t_{WB} = t_{WB} - t_{WB,Ref} \quad 10-9$$

Dabei sind:

- Δt_{Bef} Änderung der Beförderungszeit [min]
- Δt_{WF} Änderung der Wartezeiten im Fahrplan (aus planmäßiger Fahrzeitverlängerung) gegenüber dem Ausgangszustand [min]
- Δt_{WB} Änderung der Wartezeiten im Betrieb gegenüber dem Ausgangszustand [min]
- t_{WB} Wartezeiten im Betrieb (aus außerplanmäßiger Wartezeit) [min]
- $t_{WB,Ref}$ Wartezeiten im Betrieb für den Ausgangszustand [min]

Beispiel

Zur Verdeutlichung der o. g. Formeln wird die Maßnahmenart „Beharren mit geringerer Höchstgeschwindigkeit“ dargelegt. Die zugehörigen Werte vor und nach Anwendung der Maßnahmenart sind in Tabelle 10-8 dargestellt.

Tabelle 10-8: Beispiel: Beharren mit geringerer Höchstgeschwindigkeit

	Vor Anwendung der Maßnahmenart	Nach Anwendung der Maßnahmenart
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	100	80
t_{WB} [min]	1,49	-
$t_{WB,Ref}$ [min]	-	1,66
Fahrzeit [min]	31,50	39,38

Somit ergeben sich:

$$\Delta t_{Ref} = \Delta t_{WF} + \Delta t_{WB} = 39,38min - 31,50min + 0,18min = 8,06min \quad 10-10$$

$$\Delta t_{WB} = t_{WB} - t_{WB,Ref} = 1,66min - 1,49min = 0,18min \quad 10-11$$

10.2.3 Berechnung des Schallpegels nach Schall 03

Die Berechnung des Schallpegels erfolgt mit den Formeln der Schall 03 im Rahmen der 16. BImSchV. In Anlage 2 ist dort die Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege dargelegt. Zur Berechnung wird Gleichung 1 unter Punkt 3.2 verwendet (BMUB 2014). Dabei wird für jede Zugkonfiguration des Güterzuges eine gesonderte Berechnung durchgeführt, da das Ergebnis u. a. von der Geschwindigkeit und der Länge des Zuges abhängig ist. Folgende Einflussgrößen gelten unabhängig von der Zugkonfiguration für alle Züge, sofern nichts anderes angegeben ist:

- Fahrbahnart: Schwellengleis
- Schallminderungstechniken am Gleis: keine
- Brücken: keine
- Auffälligkeit von Eisenbahngeräuschen: keine
- Lokomotive: E-Lok mit Rad- oder Wellenscheibenbremse

Die Berechnungen des Schallpegels erfolgte mit einem am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik entwickelten Tool (siehe Abbildung 10-3). Die korrekte Funktion des Tools wurde mit den Ergebnissen der Testaufgaben des BMVI (2015b) sichergestellt.

Abbildung 10-3: Screenshot des Tools zur Berechnung des Schallpegels (Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik 2016a)

Mit dem Tool können alle möglichen Zugkonfigurationen, auch für die jeweiligen Maßnahmenarten, eingegeben und der Schallleistungspegel berechnet werden.

10.3 Beschreibung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten

Die Abfolge der Maßnahmenarten orientiert sich am Übersichtsbild zu den Maßnahmenarten (siehe Abbildung 5-3 und Tabelle 10-1). Die Grundlagen für die Beschreibung bilden der Steckbrief aus Kapitel 7.2 und die detaillierten Bewertungskriterien des Schemas aus Kapitel 9. Dabei werden, gesondert für jede Maßnahmenart, die möglichen Dimensionen (siehe Kapitel 5.5) beschrieben. Für jede Maßnahmenart werden eine allgemeine Beschreibung, die Erläuterungen zu den monetären Bewertungskriterien (Kosten, betriebliche Wirkung und Nutzen) und die Aussagen zur Umsetzbarkeit sowie den Kombinationsmöglichkeiten aufgeführt, um einem Anwender die Informationen zu den Maßnahmenarten jeweils vollständig darzulegen. Daher lassen sich textliche Wiederholungen nicht vermeiden.

Zur Vorbeugung einer Scheingenaugigkeit werden die Ergebnisse der monetären Berechnung der Kriterien auf eine Nachkommastelle gerundet.

10.3.1 Änderung des Wagenzuges

Art der Wagen – nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen

Beschreibung

Im Rahmen der Maßnahmenart wird der Anteil der leisen und neuen Bremsen (= Verbundstoff-Klotzbremse = LL-Sohle) sukzessive gesteigert. Demgegenüber reduziert sich der Anteil der lauten und alten Bremsen (= Grauguss-Klotzbremse = GG-Sohle). Durch den teilweisen oder kompletten Verzicht auf die GG-Sohle wird die Fahrfläche der Radsätze bei Bremsungen weniger aufgeraut. Die Fahrflächen behalten somit länger eine glattere Oberfläche. Damit wird eine Reduktion der Schallemission erreicht. Die größte Schallreduktion wird erreicht, wenn ein kompletter Zug mit Wagen gebildet wird, die alle mit einer LL-Sohle ausgestattet sind.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte die Verwendung von Wagen mit leisen und neuen Bremsen z. B. für eine bestimmte Strecke vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Durch die Anwendung der Maßnahme besteht ein Zug komplett aus Wagen mit LL-Sohlen. Dadurch könnte die Geschwindigkeit des Zuges angehoben werden, da gegenüber der Ausgangskonfiguration eine Differenz des Schallpegels entstanden ist, die für eine höhere Geschwindigkeit genutzt werden kann. So bliebe das Schallniveau gleich, die Fahrzeit würde aber verkürzt werden. Aufgrund der Konfiguration könnten sich andere Routen (Ort) ergeben, die vorher nicht gefahren werden konnten. Es wäre denkbar, mit Wagen mit LL-Sohle durch bebautes Gebiet und mit Wagen mit GG-Sohle durch nicht bebautes Gebiet zu fahren. Hier würden sich ebenfalls geänderte Fahrzeiten ergeben. Ebenso könnte bei der Planung zwischen Tag und Nacht (Zeit) unterschieden werden. Am Tag könnten z. B. Züge mit GG-Sohle zum Einsatz kommen. Demgegenüber könnten nachts Züge mit LL-Sohle eingeplant werden. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit aufgrund der Verwendung von LL-Sohlen, andere Routen sowie eine Unterscheidung zwischen Tag und Nacht wurden im Rahmen der Arbeit nicht untersucht.

Der Einsatz von Wagen mit leisen und neuen Bremsen kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. So werden EVU belohnt, die z. B. eine bestimmte Anzahl von Wagen mit LL-Sohle in einen Zug einstellen. Dies wird bereits mit der lärmabhängigen Komponente im Rahmen des Trassenpreissystems der DB Netz AG umgesetzt (DB Netz AG 2016).

Die Maßnahmenart kann sowohl in der Planung als auch in der Durchführung zum Einsatz kommen. In der Planung ist ein Einsatz immer möglich, da sich dort keine Restriktionen hinsichtlich Ort und Zeit (siehe oben) ergeben. Der erstellte Fahrplan muss fahrbar sein und die durchzuführenden Rangiertätigkeiten zur Zugzusammenstellung müssen möglich sein. Dies sollte während der Planung beachtet werden und entsprechend Eingang in den Fahrplan finden. In der Durchführung ist es nicht immer möglich, die Maßnahmenart einzusetzen. Dies hängt mit dem zugrundeliegenden Fahrplan, den Streckenöffnungszeiten, der Verfügbarkeit des Rangierpersonals und der vorzuhaltenden Infrastruktur zusammen. Sollten sich bei mindestens einem der vier genannten Punkte Einschränkungen ergeben, ist eine Anwendung der Maßnahme entsprechend zu prüfen. Ggf. kann dann die Maßnahmenart nicht umgesetzt werden.

Die Definition von insgesamt 58 Modellzüge (siehe Tabelle 10-9 und Anlage 12) und der Variation der Wagenanzahl mit LL-Sohle bzw. GG-Sohle in Zweierschritten entspricht nicht der Festlegung im Rahmen des Schienenlärmgesetzes, nach der ein Güterzug mit mindestens einem lauten Wagen als komplett lauter Zug angesehen wird. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit der Maßnahmenarten untereinander, wurde diese Festlegung bei der Auswahl und der Untersuchung der Modellzüge nicht berücksichtigt.

Tabelle 10-9: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen...: Modellzüge mit Variation der Wagenanzahl

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Summe der Wagen [-]
1 – 19	100	0 bis 36	36 bis 0	36
20 – 38	80			
39 – 48	100	0 bis 18	18 bis 0	18
49 – 58	80			

Kosten

Bei Anwendung der jeweiligen Maßnahmen ergeben sich Kostenänderungen bei der Instandhaltung der Güterwagen. Die Verbundstoff-Klotzbremsen müssen öfter gewartet werden als die Grauguss-Klotzbremsen. Des Weiteren sind Ersatzteile für die Verbundstoff-Klotzbremsen kostenintensiver gegenüber Grauguss-Klotzbremsen. (BMVI 2016a), (UBA 2017a)

In Tabelle 10-10 sind die verwendeten Parameter zur Berechnung der Instandhaltungskosten der Güterwagen dargestellt. Die Anschaffungskosten eines Wagens mit LL-Sohle entsprechen dabei dem 1,5-fachen gegenüber einem Wagen mit GG-Sohle.

Tabelle 10-10: Parameter zur Berechnung der Instandhaltungskosten der Güterwagen (Dickenbrok 2012), (Statistisches Bundesamt 2017b)

Parameter	Einsatzzeit [min/a]	Anschaffungskosten [€]	Instandhaltungskostensatz [-]
GG-Sohle	19.200	79.000	0,03
LL-Sohle	19.200	118.500	0,06

Die übrigen Parameter zur Kostenberechnung sind unabhängig von der Sohlenart und nehmen für die Modellzüge dieselben Werte an.

Da der Umfang und die Dauer der ggf. erforderlichen Rangiertätigkeiten zur Umsetzung der Maßnahmenart in der Arbeit nicht betrachtet werden und daher keine belastbare Aussage möglich ist, werden die Kosten für die Rangiertätigkeiten und das Rangierpersonal nicht weiter berücksichtigt.

Betriebliche Wirkung

Da davon ausgegangen wird, dass sich durch den Einsatz von Wagen mit LL-Sohle anstatt Wagen mit GG-Sohle die Höchstgeschwindigkeit des Zuges nicht ändert, ergeben sich keine Änderungen hinsichtlich der Nennleistung. Daher ergeben sich keine zusätzlichen Kosten.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurde die Anzahl der Verbundstoff-Klotzbremsen kontinuierlich erhöht. Dementsprechend reduziert sich die Anzahl der Grauguss-Klotzbremsen. Die Berechnungen wurden für die o. g. Modellzüge durchgeführt.

Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Anlage 12 und Tabelle 10-11) geht hervor, dass die Schallreduktion mit zunehmendem Einsatz von Wagen mit LL-Sohle steigt. Des Weiteren weist ein kurzer Zug (18 Wagen) einen geringeren Schallpegel auf als ein langer Zug (36 Wagen). Ebenfalls weist ein langsamer Zug (80 km/h) einen geringeren Schallpegel auf als ein schneller Zug (100 km/h). Damit die Schallreduktion durch den Menschen wahrnehmbar ist, müssen, unabhängig von den untersuchten Höchstgeschwindigkeiten, bei einem langen Zug mindestens 28 und bei einem kurzen Zug mindestens 14 Wagen mit LL-Sohlen ausgerüstet sein.

Die Modellzüge 1, 20, 39 und 49 stellen jeweils den Ausgangsfall ohne Einsatz der Maßnahmenart dar. Die Modellzüge 19, 38, 48 und 58 zeigen den maximalen Nutzen der Maßnahmenart für die jeweilige Modellzugkonfiguration.

Insgesamt ergeben sich sehr ähnliche Minderungspotenziale beim Einsatz von LL-Sohlen gegenüber GG-Sohlen. Die größte Schallreduktion wird bei einem langen und schnellen Zug mit 4,81 dB(A) erreicht.

Tabelle 10-11: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen und ...: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug)

Modellzug	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
19		36	0	107,31	-4,81
20	80	0	36	110,88	-
38		36	0	106,10	-4,78
39	100	0	18	109,15	-
48		18	0	104,43	-4,72
49	80	0	18	107,92	-
58		18	0	103,23	-4,69

In Tabelle 10-12 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-12: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen und ...: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 19	44	24	-20
20 und 38	37	21	-16
39 und 48	30	16	-14
49 und 58	26	13	-13

Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist generell überall ein- und umsetzbar, solange die oben beschriebenen Voraussetzungen erfüllt sind. Die Dauer bis zur Umsetzbarkeit ist als hoch zu bewerten, da zum einen die Maßnahmenart eine lange Planungsphase umfasst, da die bestellten Zugkonfigurationen aller EVU berücksichtigt werden müssen. Zum anderen müssen entsprechend viele Wagen mit LL-Sohle vorhanden sein, um komplette Züge damit bilden zu können. Erst dann wird sich ein spürbarer Effekt einstellen.

Kombinationsmöglichkeit

Wie bereits in Tabelle 9-13 dargestellt, ist die Maßnahmenart mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar. Es existieren also keine Einschränkungen hinsichtlich der Kombinierbarkeit.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-11) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit (100 bzw. 80 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen für einen langen Zug zwischen 0 und 36 und für einen kurzen Zug zwischen 0 und 18 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden die Modellzüge mit den Nummern 19, 38, 48 und 58 (siehe Tabelle 10-13 und Anlage 12) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Reduzierung des Schallpegels ergab.

Tabelle 10-13: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]			
	19	38	48	58
Kosten	12.644,20	10.234,20	6.686,80	5.193,10
betriebliche Wirkung	0,00	0,00	0,00	0,00
Nutzen	45.446,50	24.198,80	29.339,40	14.557,90

10.3.2 Fahrzeitveränderung

Beschleunigen – geringere Beschleunigung

Beschreibung

Im Rahmen der Untersuchung dieser Maßnahmenart wird die Anfahrzugkraft sukzessive vermindert, sodass die Beschleunigungsphase verlängert wird. Durch die Variation wird eine Reduktion der Schallemissionen erreicht, gleichzeitig steigen die Fahrzeiten der betrachteten Güterzüge an. Die Schallreduktion fällt umso größer aus, je mehr die Anfahrzugkraft reduziert wird.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte eine geringere Anfahrzugkraft z. B. für eine bestimmte Strecke vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen und so den Einsatz zu rechtfertigen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. So werden EVU belohnt, die eine bestimmte Anfahrzugkraft bei der Planung berücksichtigen und im Betrieb nicht überschreiten. Demgegenüber könnte es verboten werden, eine bestimmte Anfahrzugkraft zu überschreiten.

Da die Maßnahmenart die Fahrzeit beeinflusst, sollte diese vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU stattfinden. Das EIU könnte z. B. für eine bestimmte Strecke die Anfahrzugkraft festlegen. Dabei muss beachtet werden, dass mit zunehmender Verringerung der Anfahrzugkraft auch die Nennleistung der Strecke sinkt. Die Züge, welche aufgrund der geringeren Nennleistung nicht mehr auf der Strecke verkehren können, müssen dann entweder über andere Strecken umgeleitet werden oder ausfallen. Beide Möglichkeiten verursachen Kosten und sind demzufolge gegeneinander und in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abzuwägen. Der erstellte Fahrplan muss fahrbar sein und die verringerten Zugkräfte entsprechend beinhalten. Eine Anwendung

im Betrieb ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch andere Züge nicht beeinträchtigt werden. So können z. B. einzelne Züge auf Strecken mit geringer Zugzahl angepasst werden. Aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge ist eine Änderung der Anfahrzugkraft im Betrieb nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich.

Es wurden insgesamt 88 Modellzüge (siehe Tabelle 10-14 und Anlage 13) definiert und bei diesen die Anfahrzugkraft in 5 %-Schritten variiert.

Tabelle 10-14: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Modellzüge mit Variation der Anfahrzugkraft

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Variation der Anfahrzugkraft [%]
1 – 11	100	0	36	85 – 100
12 – 22		36	0	
23 – 33	80	0	36	50 – 100
34 – 44		36	0	
45 – 55	100	0	18	
56 – 66		18	0	
67 – 77	80	0	18	
77 – 88		18	0	

Kosten

Die Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich vorwiegend aus der Verlängerung der Fahrzeit. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz. Dies führt zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen. Zum anderen ergibt sich durch die Verringerung der Nennleistung ein geringerer Gewinn.

Allerdings ergeben sich durch die geringere Beschleunigung Einsparungen beim Energieverbrauch.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der anzusetzenden Beschleunigung sind.

Betriebliche Wirkung

Wie bereits beschrieben muss auf Grund der geringeren Anfahrzugkraft die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 13 dargestellt.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurden die Zugkräfte kontinuierlich verringert. Entsprechend erhöht sich die Dauer der Beschleunigungsphase und damit die Fahrzeit der Züge im betrachteten Streckenabschnitt.

Da für den Modellzug 1 der Zeitpunkt des Erreichens von 100 km/h bekannt war, konnte mit diesem und der verringerten Anfahrzugkraft zurückgerechnet werden und so die verminderte

Geschwindigkeit zum selben Zeitpunkt bestimmt werden. Somit ergibt sich für die Modellzüge 4 und 15 eine Geschwindigkeit von 92 km/h. Eine weitere Verringerung der Anfahrzugkraft wurde für die Modellzüge bis Nummer 23 nicht vorgenommen, da die vorgesehene Geschwindigkeit von 100 km/h nicht erreicht wird. Dies ist mit der Länge des Streckenabschnitts und der Masse des Modellzuges zu begründen. Die Rückrechnung erfolgte ebenfalls für die Modellzüge 33 und 44. Diese weisen jeweils eine Geschwindigkeit von 41 km/h auf.

Die verminderten Geschwindigkeiten sollten auch im folgenden Streckenabschnitt gefahren werden bzw. die Maßnahmenart mit der Maßnahmenart „Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})“ in Kombination angewendet werden.

Wie in Kapitel 9.4 beschrieben ist es aufgrund der sich ändernden Geschwindigkeiten während der Beschleunigungsphase nicht möglich, einen einzigen Wert für die dB(A)-Reduktion zu benennen. Daher wurden für die Ausgangsbeschleunigungskurve und die, aufgrund der Änderung der Anfahrzugkraft neue Beschleunigungskurve zwei Trendlinien ermittelt. Diese wurden integriert, sodass zwischen dem Beginn und dem Ende der jeweiligen Beschleunigungsphase die Flächen unterhalb der Linie berechnet werden konnten. Durch Subtraktion der beiden Flächen ergab sich die dB(A)-Reduktion für die gesamte Beschleunigungsphase (siehe Tabelle 10-15). Diese wurde auf einen Kilometer umgerechnet und für die Berechnung des monetären Nutzens (siehe Formel 9-65) verwendet.

Tabelle 10-15: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Modellzüge und Schallpegelminderung

Modellzugnummer	Anfahrzugkraft [%]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•k m]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{\text{Nutzen}} / L_{\text{Zug}}$ [dB(A)]
1	100	-	-	-
4	85	-7,59	5,9	-1,30
12	100	-	-	-
15	85	-1,24	5,9	-0,20
23	100	-	-	-
33	50	-3,55	3,2	-1,10
34	100	-	-	-
44	50	-1,43	3,2	-0,50

Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Tabelle 10-16 und Anlage 13) geht hervor, dass ein Zug mit LL-Sohlen einen geringeren Schallpegel aufweist, als ein Zug mit GG-Sohlen. Insgesamt ergeben sich, unabhängig von der Sohlenart, fast gleiche Minderungspotenziale. Die größte Schallreduktion wird bei einem langen Zug mit GG-Sohlen und 50 % Anfahrzugkraft mit 2,84 dB(A) erreicht. Durch den Vergleich der Schallpegel bei voller und verminderter Leistung folgt, dass der Einfluss der Emissionen des Motors auf den Gesamtschallpegel sehr gering ist. Die Reduktion des Pegels wird größtenteils durch die Geschwindigkeitsverringerung erreicht.

Tabelle 10-16: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse

Modellzugnummer	Anfahrzugkraft [%]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Beschleunigen auf [km/h]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	100	112,12	-
4				92	111,63	-0,49
	85				111,62	-0,50
12	100	36	0	100	107,31	-
15				92	106,83	-0,48
	85				106,80	-0,51
23	100	0	36	80	110,88	-
33				41	108,11	-2,77
	50				108,04	-2,84
34	100	36	0	80	106,10	-
44				41	103,49	-2,61
	50				103,29	-2,81

In Tabelle 10-17 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-17: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 4	44	41	-3
12 und 15	24	23	-1
23 und 33	37	27	-10
34 und 44	21	13	-8

Umsetzbarkeit

Wie bereits beschrieben ist die Maßnahmenart generell überall ein- und umsetzbar, solange eine entsprechende Planung des EVU und eine Festlegung der Verringerung der Anfahrzugkraft seitens des EIU erfolgt. Für einzelne Züge ist die Dauer bis zur Umsetzbarkeit als gering zu bewerten, da sehr schnell eine Verringerung festgelegt werden kann.

Kombinationsmöglichkeit

Die Maßnahmenart ist mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar. Es existieren also keine Einschränkungen.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-16) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Anfahrzugkraft

(50- 100 %) und der entsprechenden Zielgeschwindigkeit (100 bzw. 80 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen zwischen 0 und 36 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden die Modellzüge mit den Nummern 4, 15, 33 und 44 (siehe Tabelle 10-18 und Anlage 13) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Reduzierung der Nennleistung und des Schallpegels ergab. Da durch die Anwendung der Maßnahme die Anfahrzugkraft bei den ausgewählten Modellzügen am stärksten reduziert wurde, ergeben sich dadurch auch die größten Änderungen der Kosten und des Gewinns.

Tabelle 10-18: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]			
	4	15	33	44
Kosten	5.717,40	9.806,70	14,90	1.649,20
betriebliche Wirkung	-58.954,60	-57.657,20	-123.038,60	-119.902,20
Nutzen	554,40	44,50	142,60	26,00

Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})

Beschreibung

Im Rahmen der Maßnahme wird die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit verringert und so die Dauer der Beschleunigungsphase verkürzt. Durch die verringerte Höchstgeschwindigkeit wird eine Reduktion der Schallemissionen erreicht, gleichzeitig steigen die Fahrzeiten der betrachteten Güterzüge an, da auf die kürzere Beschleunigungsphase ein Abschnitt mit verringerter Höchstgeschwindigkeit folgt. Die Schallreduktion fällt umso größer aus, je mehr die Geschwindigkeit verringert wird bzw. je größer das Delta zur Ausgangsgeschwindigkeit ist.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte die Verringerung der Höchstgeschwindigkeit z. B. für eine bestimmte Strecke per Gebot vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen und so den Einsatz der Maßnahme zu rechtfertigen.

Das EIU könnte die Anwendung der Maßnahme mit einem Gebot versehen. Die EVU müssen dann eine bestimmte Höchstgeschwindigkeit bei der Planung und im Betrieb einhalten und dürfen diese nicht überschreiten. Demgegenüber könnten EVU belohnt werden, die dieses Gebot berücksichtigen.

Da auch diese Maßnahmenart die Fahrzeit beeinflusst, sollte diese vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU zum Einsatz kommen. Dabei kann das EIU

z. B. für eine bestimmte Strecke die Verringerung der Höchstgeschwindigkeit festlegen. Es muss beachtet werden, dass mit zunehmender Geschwindigkeitsverringering auch die Nennleistung der Strecke sinkt. Die Züge, welche aufgrund der geringeren Nennleistung nicht mehr auf der Strecke verkehren können, müssen dann entweder über andere Strecken umgeleitet werden oder ausfallen. Beide Möglichkeiten verursachen Kosten und sind demzufolge gegeneinander und in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abzuwägen. Der erstellte Fahrplan muss fahrbar sein und die verringerte Höchstgeschwindigkeit entsprechend beinhalten. Eine Anwendung im Betrieb ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch der Fahrplan nicht beeinträchtigt wird. So können z. B. einzelne Züge auf Strecken mit geringer Zugzahl angepasst werden. Aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge ist eine Änderung der Höchstgeschwindigkeit im Betrieb nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich.

Es wurden insgesamt 28 Modellzüge (siehe Tabelle 10-19 und Anlage 14) definiert und bei diesen die Höchstgeschwindigkeit in 5 km/h-Schritten variiert.

Tabelle 10-19: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Modellzüge mit Variation der Höchstgeschwindigkeit

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Variation von v_{\max} [km/h]
1 – 7	100	0	36	70 – 100
8 – 14	80	36	0	
15 – 21	100	0	18	
22 – 28	80	18	0	

Kosten

Die Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich vorwiegend aus der Verlängerung der Fahrzeit. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz. Dies führt zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen. Zum anderen ergibt sich durch die Verringerung der Nennleistung ein geringerer Gewinn.

Allerdings führt die verringerte Geschwindigkeit zu Einsparungen beim Energieverbrauch.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der zu fahrenden Geschwindigkeit sind.

Betriebliche Wirkung

Wie bereits beschrieben muss auf Grund der verringerten Höchstgeschwindigkeit die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 14 dargestellt.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurde die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit kontinuierlich verringert. Entsprechend erhöht sich die Fahrzeit der Züge während der Beschleunigungsphase und der Fahrt mit verringerter Höchstgeschwindigkeit.

Da für einen Modellzug ohne Anwendung der Maßnahme der Zeitpunkt des Erreichens der Höchstgeschwindigkeit bekannt ist, konnte für einen Modellzug mit Anwendung der Maßnahme die Dauer und Länge des Fahrens mit verringerter Geschwindigkeit ermittelt werden. Diese Trendlinie entspricht einer Geraden (siehe Abbildung 10-4) und wird, wie die Trendlinie der Beschleunigung ohne Anwendung der Maßnahme, integriert.

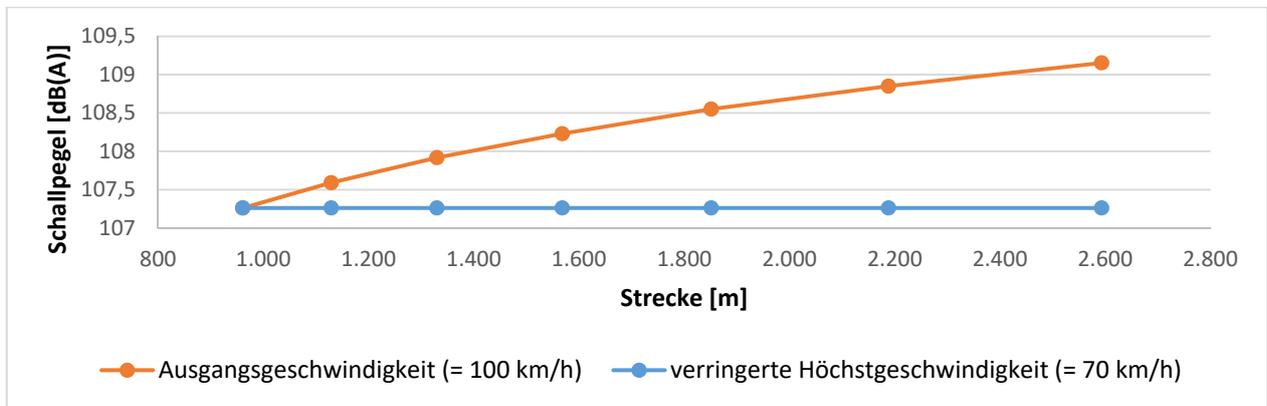


Abbildung 10-4: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Gegenüberstellung der Modellzüge 15 und 21 (eigene Darstellung)

Durch Subtraktion der beiden Flächen unterhalb der Linien ergibt sich die dB(A)-Reduktion für die Beschleunigungsphase der ausgewählten Modellzüge (siehe Tabelle 10-20). Diese wird auf einen Kilometer umgerechnet und für die Berechnung des monetären Nutzens (siehe Formel 9-65) verwendet.

Tabelle 10-20: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Modellzüge und Schallpegelminderung

Modellzugnummer	v_{\max} [km/h]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•k m]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{\text{Nutzen}} / L_{\text{Zug}}$ [dB(A)]
1	100	-	-	-
7	70	-4,2	7,92	-0,50
15	100	-	-	-
21	70	-1,55	2,59	-0,60

Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Tabelle 10-21 und Anlage 14) geht hervor, dass ein kurzer Zug (18 Wagen) einen geringeren Schallpegel aufweist, als ein langer Zug (36 Wagen). Insgesamt ergeben sich fast gleiche Minderungspotenziale bei Verringerung der Geschwindigkeit. Die größte Schallreduktion wird bei einem langen Zug mit 1,90 dB(A) erreicht.

Tabelle 10-21: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug)

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
7	70			110,22	-1,90
15	100	0	18	109,15	-
21	70			107,26	-1,89

In Tabelle 10-22 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-22: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 7	44	34	-10
15 und 21	30	24	-6

Umsetzbarkeit

Wie bereits beschrieben ist die Maßnahmenart generell überall ein- und umsetzbar, solange eine entsprechende Planung des EVU und eine Festlegung der Geschwindigkeitsverringerung seitens des EIU erfolgt. Für einzelne Züge ist die Dauer bis zur Umsetzbarkeit als gering zu bewerten, da sehr schnell eine Verringerung festgelegt werden kann.

Kombinationsmöglichkeit

Die Maßnahmenart ist nicht mit der Maßnahmenart „Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen“ kombinierbar, da die Höchstgeschwindigkeit nicht gleichzeitig reduziert und ausgenutzt werden kann. Ansonsten bestehen diesbezüglich keine Einschränkungen.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-21) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit (70 bzw. 100 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen für einen langen Zug zwischen 0 und 36 und für einen kurzen Zug zwischen 0 und 18 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden die Modellzüge mit den Nummern 7 und 21 (siehe Tabelle 10-23 und Anlage 14) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Reduzierung der Nennleistung und des Schallpegels ergab. Da durch die Anwendung der Maßnahme die Geschwindigkeit bei den genannten Modellzügen am stärksten reduziert wird, resultieren daraus auch die größten Änderungen der Kosten und des Gewinns.

Tabelle 10-23: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]	
	7	21
Kosten	5.890,10	3.793,30
betriebliche Wirkung	-506.500,80	-295.689,70
Nutzen	158,00	37,60

Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen

Beschreibung

Mit der Maßnahmenart soll die Höchstgeschwindigkeit eines Zuges ausgenutzt werden. Im Netz der Deutschen Bahn existieren Strecken, auf denen im Mittel eine geringere Geschwindigkeit gefahren wird und dieser Mittelwert teilweise stark von der Höchstgeschwindigkeit abweicht. Zur Untersuchung der Maßnahmenart wird die Geschwindigkeit der Modellzüge sukzessive gesteigert. Durch die Steigerung ergibt sich eine Erhöhung der Schallemissionen, gleichzeitig sinkt die Dauer der Einwirkung und die Fahrzeit des Zuges verkürzt sich. Die Schallerhöhung fällt umso größer aus, je mehr die Geschwindigkeit gesteigert wird bzw. je größer das Delta zur Ausgangsgeschwindigkeit ist.

Die Untersuchung der Maßnahmenart findet statt, obwohl durch die Geschwindigkeitssteigerung die Schallemissionen erhöht werden. Dies liegt darin begründet, da im Rahmen dieser Arbeit nicht die Wirkzusammenhänge zwischen Einwirkungsdauer und Schallpegelhöhe betrachtet werden. Es wird also keine Aussage getroffen, ob eine längere Einwirkungsdauer mit einem geringeren Schallpegel positiver gegenüber einer kurzen Einwirkungsdauer und einem höheren Schallpegel ist. Die Untersuchung bezieht sich daher auf dieselben Kriterien wie bei allen anderen Maßnahmenarten.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte die Steigerung der Höchstgeschwindigkeit z. B. für eine bestimmte Strecke vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Tagesstunden an, da dort das Schallniveau höher ist als in der Nacht. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in wenig oder nicht bewohntem Gebiet einzusetzen, um möglichst wenige Betroffene zu beeinträchtigen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. EVU, die eine bestimmte Höchstgeschwindigkeit bei der Planung und im Betrieb berücksichtigen bzw. fahren und so eine höhere Nennleistung auf einer Strecke generieren, könnten belohnt werden. Diese kann für den Verkauf von zusätzlichen Trassen genutzt werden.

Die Maßnahmenart sollte vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU stattfinden, da die Fahrzeit beeinflusst wird. Das EIU könnte z. B. für eine bestimmte Strecke die Höchstgeschwindigkeit festlegen. Dabei steigt mit zunehmender Geschwindigkeitssteigerung auch die Nennleistung der Strecke. Die Strecke könnte also zusätzliche Züge aufnehmen, was zum einen eine Erhöhung des Schallpegels und zum anderen eine Erhöhung des Gewinns zur Folge hat. Diese beiden Punkte müssen im Hinblick auf die Anwendung der Maßnahme abgewogen werden. Der erstellte

Fahrplan muss fahrbar sein und die „neue“ Höchstgeschwindigkeit entsprechend beinhalten. Eine Anwendung im Betrieb ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch der Fahrplan nicht beeinträchtigt wird. So können z. B. einzelne Züge auf Strecken mit geringer Zugzahl angepasst werden. Aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge ist eine Änderung der Höchstgeschwindigkeit im Betrieb nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich.

Es wurden insgesamt 40 Modellzüge (siehe Tabelle 10-24 und Anlage 15) definiert und die Geschwindigkeit in 5 km/h-Schritten variiert.

Tabelle 10-24: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen: Modellzüge mit Variation der Höchstgeschwindigkeit

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Variation von v_{\max} [km/h]
1 – 5	100	0	36	100 – 105
6 – 10		36	0	
11 – 15	80	0	36	80 – 100
16 – 20		36	0	
21 – 25	100	0	18	100 – 120
26 – 30		18	0	
31 – 35	80	0	18	80 – 100
36 – 40		18	0	

Kosten

Die Änderungen der Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich vorwiegend aus der Verkürzung der Fahrzeit. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen kürzer im Einsatz, was zu niedrigeren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkung führt. Zum anderen ergibt sich durch die Erhöhung der Nennleistung ein höherer Gewinn.

Allerdings führt die erhöhte Geschwindigkeit zu einem Mehrverbrauch an Energie.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der zu fahrenden Geschwindigkeit sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund der veränderten Höchstgeschwindigkeit konnte die Nennleistung erhöht werden und gleichzeitig der Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 eingehalten werden. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 15 dargestellt.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurde die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit kontinuierlich gesteigert. Entsprechend verringert sich die Fahrzeit der Züge im betrachteten Streckenabschnitt. Da die gefahrenen Geschwindigkeiten im gesamten Abschnitt konstant sind, liefert die Subtraktion der Schallpegel der Ausgangshöchstgeschwindigkeit und der geänderten Höchstgeschwindigkeit direkt die dB(A)-Steigerung. Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Tabelle 10-25

und Anlage 15) geht hervor, dass die Steigerung bei einem Zug mit LL-Sohlen geringer ist, als bei einem Zug mit GG-Sohlen. Insgesamt ergeben sich sehr ähnliche Steigerungen der Schallpegel gegenüber der Ausgangsgeschwindigkeit. Die größte Steigerung wird bei Modellzug 15 mit 1,24 dB(A) erreicht.

Aufgrund der Berechnung des Nutzens (siehe Formeln 9-64 und 9-65) ergibt sich ein negativer Nutzen, obwohl die Geschwindigkeit gesteigert wurde. Um die Konsistenz zu den anderen Maßnahmenarten zu wahren, wurden die Formeln unangepasst verwendet.

Tabelle 10-25: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug)

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
2	105			112,41	+0,29
6	100	36	0	107,31	-
7	105			107,60	+0,29
11	80	0	36	110,88	-
15	100			112,12	+1,24
16	80	36	0	106,10	-
20	100			107,31	+1,21
21	100	0	18	109,15	-
25	120			110,30	+1,15
26	100	18	0	104,43	-
30	120			105,55	+1,12
31	80	0	18	107,92	-
35	100			109,15	+1,23
36	80	18	0	103,23	-
40	100			104,43	+1,20

In Tabelle 10-26 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-26: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 2	44	46	+2
6 und 7	24	25	+1
11 und 15	37	44	+7
16 und 20	21	24	+3
21 und 25	30	34	+4
26 und 30	16	19	+3
31 und 35	26	30	+4
36 und 40	13	16	+3

Umsetzbarkeit

Wie bereits beschrieben ist die Maßnahmenart generell überall ein- und umsetzbar, solange eine entsprechende Planung des EVU und eine Festlegung der Höchstgeschwindigkeit seitens des EIU erfolgt. Für einzelne Züge ist die Dauer bis zur Umsetzbarkeit als gering zu bewerten, da sehr schnell eine Erhöhung festgelegt werden kann.

Kombinationsmöglichkeit

Wie bereits in Tabelle 9-13 dargestellt, ist die Maßnahmenart nicht mit den Maßnahmenarten „Beschleunigen: geringe Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“ und „Beharren: geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“ kombinierbar. Sonst bestehen diesbezüglich keine Einschränkungen.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-25) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit (80- 120 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen für einen langen Zug zwischen 0 und 36 und für einen kurzen Zug zwischen 0 und 18 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden die Modellzüge mit den Nummern 15 und 35 (siehe Tabelle 10-27 und Anlage 15) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Erhöhung der Nennleistung und des Schallpegels ergab. Da durch die Anwendung der Maßnahme die Geschwindigkeit bei den ausgewählten Modellzügen am stärksten erhöht wird, resultieren daraus auch die größten Änderungen der Kosten und des Gewinns.

Tabelle 10-27: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]	
	15	35
Kosten	-8.512,80	-5.396,10
betriebliche Wirkung	552.653,40	306.147,00
Nutzen	-9.561,30	-6.499,20

Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})

Beschreibung

Im Rahmen der Untersuchung der Maßnahmenart wird die zu fahrende Höchstgeschwindigkeit sukzessive vermindert. Durch die Verminderung wird eine Reduktion der Schallemissionen erreicht, gleichzeitig steigen die Fahrzeiten der betrachteten Güterzüge entsprechend an. Die Schallreduktion fällt umso größer aus, je mehr die Geschwindigkeit reduziert wird bzw. je größer das Delta zur Ausgangsgeschwindigkeit ist.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte die Verminderung der Höchstgeschwindigkeit z. B. für eine bestimmte Strecke vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. EVU, die eine bestimmte Höchstgeschwindigkeit bei der Planung und im Betrieb berücksichtigen bzw. nicht überschreiten, könnten belohnt werden. Demgegenüber könnte es verboten werden, eine bestimmte Höchstgeschwindigkeit zu überschreiten.

Da die Maßnahmenart die Fahrzeit beeinflusst, sollte diese vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU stattfinden. Das EIU könnte z. B. für eine bestimmte Strecke die Höchstgeschwindigkeit festlegen. Dabei muss beachtet werden, dass mit zunehmender Geschwindigkeitsverringering auch die Nennleistung der Strecke sinkt. Die Züge, welche aufgrund der geringeren Nennleistung nicht mehr auf der Strecke verkehren können, müssen dann entweder über andere Strecken umgeleitet werden oder ausfallen. Beide Möglichkeiten verursachen Kosten und sind demzufolge gegeneinander und in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abzuwägen. Der erstellte Fahrplan muss fahrbar sein und die verringerten Höchstgeschwindigkeiten entsprechend beinhalten. Eine Anwendung im Betrieb ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch der Fahrplan nicht beeinträchtigt wird. So können z. B. einzelne Züge auf Strecken mit geringer Zugzahl angepasst werden. Aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge ist eine Änderung der Höchstgeschwindigkeit im Betrieb nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich.

Es wurden insgesamt 28 Modellzüge (siehe Tabelle 10-28 und Anlage 16) definiert und bei diesen die Höchstgeschwindigkeit in 5 km/h-Schritten variiert.

Tabelle 10-28: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Modellzüge mit Variation der Höchstgeschwindigkeit

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Variation von v_{\max} [km/h]
1 – 7	100	0	36	70 – 100
8 – 14	80	36	0	
15 – 21	100	0	18	
22 – 28	80	18	0	

Kosten

Die Änderungen der Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich vorwiegend aus der Verlängerung der Fahrzeit. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz, was zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkung. Zum anderen ergibt sich durch die Verringerung der Nennleistung ein geringerer Gewinn.

Des Weiteren ergibt sich aufgrund der verringerten Höchstgeschwindigkeit ein Minderverbrauch an Energie.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der zu fahrenden Geschwindigkeit sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund der verringerten Höchstgeschwindigkeit muss die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 16 dargestellt.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurden die Höchstgeschwindigkeiten kontinuierlich verringert. Entsprechend erhöht sich die Fahrzeit der Züge im betrachteten Streckenabschnitt. Es wurden dieselben Minderungspotenziale wie bei der Maßnahmenart „Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“ erzielt, da die betrachteten Höchstgeschwindigkeiten gleich sind. Demgegenüber ändert sich die Nennleistung (siehe betriebliche Wirkung).

Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Tabelle 10-29 und Anlage 16) geht hervor, dass ein kurzer Zug (18 Wagen) einen geringeren Schallpegel aufweist, als ein langer Zug (36 Wagen). Insgesamt stellen sich fast gleiche Minderungspotenziale bei der Verringerung der Geschwindigkeit ein. Die größte Schallreduktion wird bei einem langen Zug mit 1,90 dB(A) erreicht.

Tabelle 10-29: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse (Auszug)

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
7	70			110,22	-1,90
15	100	0	18	109,15	-
21	70			107,26	-1,89

In Tabelle 10-30 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-30: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 7	44	34	-10
15 und 21	30	24	-6

Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist generell überall ein- und umsetzbar, solange eine entsprechende Planung des EVU und eine Festlegung der Geschwindigkeitsverringerung seitens des EIU erfolgt. Für einzelne Züge ist die Dauer bis zur Umsetzbarkeit als gering zu bewerten, da sehr schnell eine Verringerung festgelegt werden kann.

Kombinationsmöglichkeit

Die Maßnahmenart ist nicht mit der Maßnahmenart „Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen“ kombinierbar. Ansonsten bestehen diesbezüglich keine Einschränkungen.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-29) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit (70- 100 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen für einen langen Zug zwischen 0 und 36 und für einen kurzen Zug zwischen 0 und 18 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden, wie bei der Maßnahmenart „Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“, die Modellzüge mit den Nummern 7 und 21 (siehe Tabelle 10-31 und Anlage 16) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Reduzierung der Nennleistung und des Schallpegels ergab. Da durch die Anwendung der Maßnahme die Geschwindigkeit bei den ausgewählten Modellzügen am stärksten reduziert wird, ergeben sich dadurch auch die größten Änderungen der Gesamtkosten.

Tabelle 10-31: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]	
	7	21
Kosten	12.143,00	7.034,50
betriebliche Wirkung	-587.876,80	-325.525,10
Nutzen	7.061,90	4.486,70

Auslaufen – Auslaufen nutzen

Beschreibung

Das Ziel der Maßnahmenart ist, durch Auslaufen die Geschwindigkeit an einem bestimmten Punkt zu verringern und so eine Reduktion der Schallemissionen zu erreichen. Dazu wird zwischen den Fahrzuständen „Beharren“ und „Bremsen“ der Zustand „Auslaufen“ eingefügt. Der Motor des Triebfahrzeugs wird abgeschaltet und der Zug verringert aufgrund der herrschenden Widerstände seine Geschwindigkeit. Durch die Abschaltung des Motors werden ebenfalls eine Schallreduktion und eine Energieeinsparung erreicht. Am Ende des Auslaufens bremst der Zug aus einer, gegenüber dem Ausgangszustand, verringerten Geschwindigkeit auf seine Zielgeschwindigkeit ab. Aufgrund der verringerten Geschwindigkeit wird die Dauer der Bremsphase verkürzt und darüber ebenfalls eine Schallreduktion erreicht. Durch die Anwendung der Maßnahme steigen die Fahrzeiten der Güterzüge an und die Nennleistung der Strecke sinkt. Die Züge, welche aufgrund der geringeren Nennleistung nicht mehr auf der Strecke verkehren können, müssen dann entweder über andere Strecken umgeleitet werden oder ausfallen. Beide Möglichkeiten verursachen Kosten und sind demzufolge gegeneinander und in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abzuwägen. Die Schallreduktion fällt umso größer aus, je länger die Phase des Auslaufens ist und je stärker die Geschwindigkeit reduziert wird bzw. je größer das Delta zur Ausgangsgeschwindigkeit ist.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte z. B. für eine bestimmte Strecke das Auslaufen vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. EVU, die das Auslaufen bei der Planung und im Betrieb entsprechend anwenden, könnten belohnt werden. Demgegenüber könnte es verboten werden, ohne die Auslaufphase zu fahren.

Da diese Maßnahmenart auch die Fahrzeit beeinflusst, sollte sie vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU stattfinden. Der erstellte Fahrplan muss fahrbar sein und den Fahrzustand „Auslaufen“ entsprechend beinhalten. Eine Anwendung im Betrieb ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch der Fahrplan nicht beeinträchtigt wird. So können z. B. einzelne Züge auf Strecken mit geringer Zugzahl angepasst werden. Aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge ist

das Einfügen einer Auslaufphase im Betrieb nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich.

Es wurden insgesamt 28 Modellzüge (siehe Tabelle 10-32 und Anlage 17) definiert und bei diesen die Geschwindigkeit in 5 km/h-Schritten variiert.

Tabelle 10-32: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Modellzüge mit Variation der Geschwindigkeit

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Variation von v_{\max} [km/h]
1 – 7	100	0	36	70 – 100
8 – 14		36	0	
15 – 21		0	18	
22 – 28		18	0	

Kosten

Die Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich vorwiegend aus der Verlängerung der Fahrzeit. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz. Dies führt zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen. Zum anderen ergibt sich durch die Verringerung der Nennleistung ein geringerer Gewinn.

Allerdings ergeben sich durch die verringerte Geschwindigkeit Einsparungen beim Energieverbrauch.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der zu fahrenden Geschwindigkeit sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund des Einsatzes der Maßnahmenart muss die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 17 dargestellt.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurden die Auslaufphase und damit die Geschwindigkeiten kontinuierlich verringert. Entsprechend erhöht sich die Fahrzeit der Züge im betrachteten Streckenabschnitt.

Da für die Modellzüge 7 und 21 der Zeitpunkt des Erreichens der verringerten Geschwindigkeit bekannt ist, konnte für die Modellzüge 1 und 15 die Dauer und Länge des Fahrens mit der Ausgangsgeschwindigkeit ermittelt werden. Diese Trendlinie entspricht einer Geraden (siehe Abbildung 10-5) und wird, wie die Trendlinie des Auslaufens, integriert.

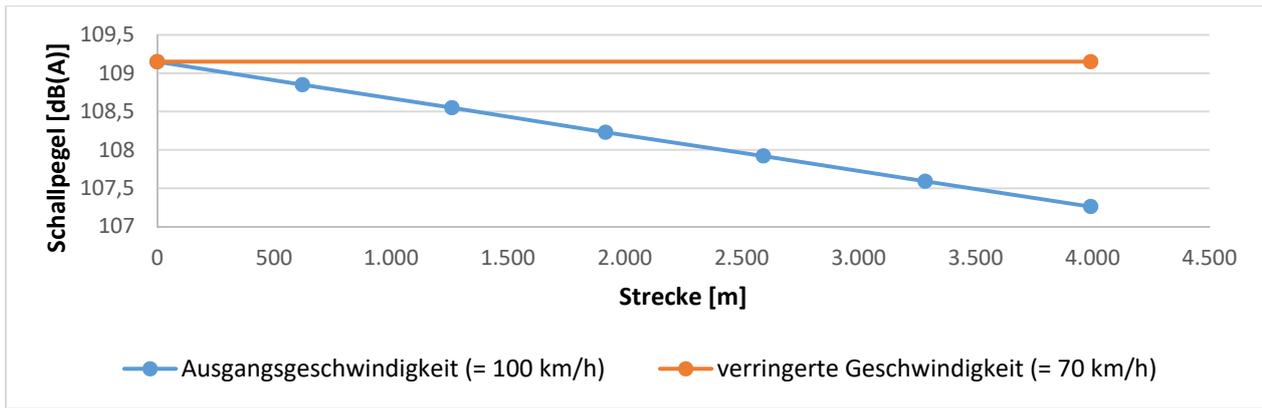


Abbildung 10-5: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Gegenüberstellung der Modellzüge 15 und 21 (eigene Darstellung)

Durch Subtraktion der beiden Flächen unterhalb der Linien ergibt sich die dB(A)-Reduktion für die Auslaufphase (siehe Tabelle 10-33). Diese wird auf einen Kilometer umgerechnet und für die Berechnung des monetären Nutzens (siehe Formel 9-65) verwendet.

Tabelle 10-33: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Modellzüge und Schallpegelminderung

Modellzugnummer	v_{\max} [km/h]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•km]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{\text{Nutzen}} / L_{\text{Zug}}$ [dB(A)]
1	100	-	-	-
7	70	-3,85	3,9	-1,00
15	100	-	-	-
21	70	-3,98	3,99	-1,00

Es werden dieselben Minderungspotenziale wie bei den Maßnahmenarten „Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“ und „Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“ erzielt, da die betrachteten Geschwindigkeiten dieselben sind (siehe Tabelle 10-34 und Anlage 17). Demgegenüber ändert sich die Nennleistung (siehe betriebliche Wirkung). Des Weiteren geht aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 hervor, dass ein kurzer Zug (18 Wagen) einen geringeren Schallpegel aufweist, als ein langer Zug (36 Wagen). Insgesamt ergeben sich fast gleiche Minderungspotenziale bei der Verringerung der Geschwindigkeit. Die größte Schallreduktion wird bei einem langen Zug mit 1,90 dB(A) erreicht. Diese Reduktion wird vorwiegend durch die verringerte Geschwindigkeit erreicht.

Tabelle 10-34: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug)

Modellzugnummer	v_{Ende} [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
7	70			110,22	-1,90
15	100	0	18	109,15	-
21	70			107,26	-1,89

In Tabelle 10-35 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-35: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 7	44	34	-10
15 und 21	30	24	-6

Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist generell überall ein- und umsetzbar, solange eine entsprechende Planung des EVU und eine Festlegung der Geschwindigkeitsverringerung seitens des EIU erfolgt. Die Dauer bis zur Umsetzbarkeit ist als gering zu bewerten, da sehr schnell für einzelne Züge eine Auslaufphase festgelegt werden kann.

Kombinationsmöglichkeit

Die Maßnahmenart ist mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar. Es existieren also keine Einschränkungen.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-34) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit (70- 100 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen für einen langen Zug zwischen 0 und 36 und für einen kurzen Zug zwischen 0 und 18 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden, wie bei den Maßnahmenarten „Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})“ und „Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})“, die Modellzüge mit den Nummern 7 und 21 (siehe Tabelle 10-36 und Anlage 17) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Reduzierung der Nennleistung und des Schallpegels ergab. Da durch die Anwendung der Maßnahme die Geschwindigkeit bei den ausgewählten Modellzügen am stärksten reduziert wird, resultieren daraus auch die größten Änderungen der Gesamtkosten.

Tabelle 10-36: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]	
	7	21
Kosten	-1.803,20	-9143,00
betriebliche Wirkung	-63.185,70	-24.064,40
Nutzen	278,80	195,60

Bremsen – geringere Beschleunigung

Beschreibung

Im Rahmen der Maßnahme wird die Bremskraft sukzessive vermindert und so die Dauer der Bremsphase verlängert. Durch die Maßnahmenart wird eine Reduktion der Schallemissionen erreicht, gleichzeitig steigen die Fahrzeiten der betrachteten Güterzüge an. Die Schallreduktion fällt umso größer aus, je mehr die Bremskraft reduziert wird. Die Emissionen der Bremsen wurden dabei nicht um dieselbe Prozentzahl reduziert, da zum einen in den Berechnungen nach Schall 03 die Bremskraft nicht berücksichtigt wird und zum anderen aus Jansen et al. (2008) lediglich Näherungswerte hervorgehen (siehe Kapitel 3.2.1).

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte eine geringere Bremsbeschleunigung z. B. für eine bestimmte Strecke vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen und so den Einsatz der Maßnahme zu rechtfertigen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. EVU, die eine bestimmte Bremskraft bei der Planung und im Betrieb nicht überschreiten, könnten belohnt werden. Demgegenüber könnte es verboten werden, eine bestimmte Bremskraft zu überschreiten.

Die Maßnahmenart beeinflusst die Fahrzeit und sollte daher vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU stattfinden. Das EIU könnte z. B. für eine bestimmte Strecke die maximale Bremskraft festlegen. Dabei muss beachtet werden, dass mit zunehmender Bremskraftverringering auch die Nennleistung der Strecke sinkt. Die Züge, welche aufgrund der geringeren Nennleistung nicht mehr auf der Strecke verkehren können, müssen dann entweder über andere Strecken umgeleitet werden oder ausfallen. Beide Möglichkeiten verursachen Kosten und sind demzufolge gegeneinander und in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abzuwägen. Der erstellte Fahrplan muss fahrbar sein und die verringerten Bremskräfte entsprechend beinhalten. Eine Anwendung im Betrieb ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch der Fahrplan nicht beeinträchtigt wird. So können z. B. einzelne Züge auf Strecken mit geringer Zugzahl angepasst werden. Aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge ist eine Änderung der Beschleunigung im Betrieb nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich.

Es wurden insgesamt 88 Modellzüge (siehe Tabelle 10-37 und Anlage 18) definiert und bei diesen die Bremskraft in 5 %-Schritten variiert.

Tabelle 10-37: Bremsen – geringere Beschleunigung: Modellzüge mit Variation der Bremskraft

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Variation der Bremskraft [%]
1 – 11	100	0	36	50 – 100
12 – 22		36	0	
23 – 33	80	0	36	
34 – 44		36	0	
45 – 55	100	0	18	
56 – 66		18	0	
67 – 77	80	0	18	
77 – 88		18	0	

Kosten

Die Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich vorwiegend aus der Verlängerung der Fahrzeit. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz. Dies führt zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen. Zum anderen ergibt sich durch die Verringerung der Nennleistung ein geringerer Gewinn.

Durch die geringere Beschleunigung werden Einsparungen beim Energieverbrauch erreicht, da die Bremsphase eher beginnen muss und sich somit die Dauer der Beharrungsphase verringert.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der anzusetzenden Beschleunigung sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund der geringeren Bremskraft muss die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 18 dargestellt.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurden die Bremskräfte kontinuierlich verringert. Entsprechend erhöhen sich die Dauer der Bremsphase und damit die Fahrzeit der Züge im betrachteten Streckenabschnitt.

Da für den Modellzug 1 die Dauer des Bremsvorgangs von 100 auf 0 km/h bekannt ist, konnte mit diesem und der verringerten Bremskraft zurückgerechnet werden und so die verminderten Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt, an dem 100 km/h gefahren werden, bestimmt werden. Somit ergibt sich für die Modellzüge 11 und 22 eine Geschwindigkeit von 50 km/h und für die Modellzüge 33 und 44 eine Geschwindigkeit von 40 km/h.

Wie in Kapitel 9.4 beschrieben ist es aufgrund der sich ändernden Geschwindigkeiten während der Bremsphase nicht möglich, einen einzigen Wert für die dB(A)-Reduktion zu benennen. Daher werden für die Ausgangsbremskurve und die, aufgrund der Änderung der Bremskraft, neue Bremskurve zwei Trendlinien ermittelt. Diese werden integriert, sodass zwischen dem Beginn und dem Ende der jeweiligen Bremsphase die Flächen unterhalb der Linien berechnet werden können. Durch Subtraktion der beiden Flächen ergibt sich die dB(A)-Reduktion für die gesamte Bremsphase (siehe Tabelle 10-38). Diese wird auf einen Kilometer umgerechnet und für die Berechnung des monetären Nutzens (siehe Formel 9-65) verwendet.

Tabelle 10-38: Bremsen – geringere Beschleunigung: Modellzüge und Schallpegelminderung

Modellzug- nummer	Bremskraft [%]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•k m]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{\text{Nutzen}} / L_{\text{Zug}}$ [dB(A)]
1	100	-	-	-
11	50	-3,90	2,2	-1,80
12	100	-	-	-
22	50	-1,3	2,2	-0,60
23	100	-	-	-
33	50	-1,08	1,4	-0,80
34	100	-	-	-
44	50	-1,06	1,4	-0,80

Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Tabelle 10-39 und Anlage 18) geht hervor, dass ein Zug mit LL-Sohlen einen geringeren Schallpegel aufweist, als ein Zug mit GG-Sohlen. Insgesamt stellen sich, unabhängig von der Sohlenart, fast gleiche Minderungspotenziale ein. Die größte Schallreduktion wird bei einem langen Zug mit GG-Sohlen und 50 % Bremskraft mit 2,84 dB(A) erreicht. Da die Schall 03 die Emission der Bremsen nicht berücksichtigt, kann kein Vergleich der Schallpegel bei voller und verminderter Kraft erfolgen. Es wird angenommen, dass die Emission des Bremsens sehr gering in Bezug auf den Gesamtschallpegel ist. Die Reduktion des Pegels wird größtenteils durch die Geschwindigkeitsverringerung erreicht.

Tabelle 10-39: Bremsen – geringere Beschleunigung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse

Modellzugnummer	Bremskraft [%]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Bremsen aus [km/h]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	100	112,12	-
11	50			50	108,80	-3,32
12	100	36	0	100	107,31	-
22	50			50	104,11	-3,20
23	100	0	36	80	110,88	-
33	50			40	108,04	-2,84
34	100	36	0	80	106,10	-
44	50			40	103,42	-2,68

In Tabelle 10-40 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-40: Bremsen – geringere Beschleunigung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 11	44	29	-15
12 und 22	24	15	-9
23 und 33	37	26	-11
34 und 44	21	13	-8

Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist generell überall ein- und umsetzbar, solange eine entsprechende Planung des EVU und eine Festlegung der Bremskraftverringerung seitens des EIU erfolgt. Für einzelne Züge ist die Dauer bis zur Umsetzbarkeit als gering zu bewerten, da sehr schnell eine Verringerung festgelegt werden kann.

Kombinationsmöglichkeit

Die Maßnahmenart ist mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar. Es existieren also keine Einschränkungen.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-39) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Bremskraft (50- 100 %) und der entsprechenden Geschwindigkeit (100 bzw. 80 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen zwischen 0 und 36 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden die Modellzüge mit den Nummern 11 und 33 (siehe Tabelle 10-41 und Anlage 18) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Reduzierung der Nennleistung und des Schallpegels ergab. Da durch die Anwendung der Maßnahme die Beschleunigung bei den ausgewählten Modellzügen am stärksten reduziert wird, resultieren daraus auch die größten Änderungen der Kosten und des Gewinns.

Tabelle 10-41: Bremsen – geringere Beschleunigung: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]	
	11	33
Kosten	625,10	463,00
betriebliche Wirkung	-27.560,00	-20.884,50
Nutzen	257,00	49,10

Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)

Beschreibung

Im Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten (VzG) ist für jeden Streckenabschnitt die maximal zulässige Geschwindigkeit festgelegt. Darauf aufbauend erfolgen die Trassenbestellung des EVU sowie die Fahrplanerstellung des EIU. Durch die Vorgabe eines schallarmen Geschwindigkeitsprofils werden die Beschleunigungs- und Bremsphasen reduziert. Somit können u. a. die Anzahl der Geschwindigkeitsspitzen verringert und darüber eine Reduktion der Schallemissionen und des Energieverbrauchs erreicht werden. Eine so optimierte Fahrt ermöglicht einen flüssigeren und damit schallärmeren Betriebsablauf.

Die Maßnahmenart wird mit den folgenden drei Szenarien untersucht:

- Szenario 1: Ein Zug beschleunigt mit 100 % Anfahrzugkraft von 0 km/h auf die zulässige Geschwindigkeit, beharrt mit dieser und bremst mit 100 % Bremskraft auf 0 km/h ab.
- Szenario 2: Ein Zug beschleunigt mit 85 % Anfahrzugkraft von 0 km/h auf eine Geschwindigkeit von 80 km/h, beharrt mit dieser und bremst mit 85 % Bremskraft auf 0 km/h ab.
- Szenario 3: Die Beschleunigungs- und Bremsphasen entfallen. Der Zug durchfährt mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h den Streckenabschnitt.

Eine Harmonisierung der Geschwindigkeitsprofile kann auch bei mehreren Zügen angewendet werden. Damit werden ebenfalls die Beschleunigungs- und Bremsphasen reduziert und Einsparungen beim Energieverbrauch erreicht. Die Harmonisierung von mehreren Zügen wirkt sich auf die Mindestzugfolgezeiten zwischen den einzelnen Zügen aus, welche wiederum die Leistungsfähigkeit der Streckenabschnitte beeinflussen. Eine monetäre Bewertung der Harmonisierung von mehreren Zügen findet im Rahmen der Arbeit nicht statt.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU könnte z. B. für eine bestimmte Strecke ein zu fahrendes Geschwindigkeitsprofil vorschreiben. Daran muss sich dann ein EVU, was auf dieser Strecke fahren möchte, halten.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen und so den Einsatz der Maßnahme zu rechtfertigen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. EVU, die ein schallarmes Geschwindigkeitsprofil bei der Planung und im Betrieb berücksichtigen, könnten belohnt werden. Demgegenüber könnte es verboten werden, ein bestimmtes Geschwindigkeitsprofil zu fahren.

Da durch die Anwendung der Maßnahme die Fahrzeit eines Zuges beeinflusst wird, sollte diese vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU stattfinden. Das EIU könnte z. B. für eine bestimmte Strecke ein schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben. Dabei muss beachtet werden, dass ein solches Profil (z.B. Verringerung der Höchstgeschwindigkeit) die Nennleistung der Strecke beeinflusst. Die Züge, welche aufgrund einer geringeren Nennleistung nicht mehr auf der Strecke verkehren können, müssen dann entweder über andere Strecken umgeleitet werden oder ausfallen. Beide Möglichkeiten verursachen Kosten und sind demzufolge gegeneinander und in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abzuwägen. Der aufgrund des schallarmen Geschwindigkeitsprofils erstellte Fahrplan muss fahrbar sein. Eine Anwendung im Betrieb ist nicht sinnvoll, da aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge eine Änderung nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich ist.

Es wurden insgesamt 87 Modellzüge gebildet, die in Tabelle 10-42 und Anlage 19 dargestellt sind.

Tabelle 10-42: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Modellzüge mit Variation der Wagenanzahl

Modellzüge	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Summe der Wagen [-]
1 – 19	100	0 bis 36	36 bis 0	36
20 – 38	80			
39 – 57	90			
58 – 67	100	0 bis 18	18 bis 0	18
68 – 77	80			
78 – 87	90			

Kosten

Die Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich vorwiegend aus der Veränderung der Fahrzeit und der Nennleistung. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz. Dies führt zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen. Zum anderen ergibt sich durch die Verringerung der Nennleistung ein geringerer Gewinn.

Allerdings führt die Änderung der Geschwindigkeit zu einem veränderten Energieverbrauch.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der zu fahrenden Geschwindigkeit sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund der verringerten Höchstgeschwindigkeit muss die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_0 von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 19 dargestellt.

Nutzen

Zur Berechnung des Schallpegels wurden die Höchstgeschwindigkeiten, die Zugkräfte und die Bremskräfte variiert. Des Weiteren entfällt im Szenario 3 der Beschleunigungs- und Bremsvorgang.

Wie in Kapitel 9.4 beschrieben ist es aufgrund der sich ändernden Geschwindigkeiten während der Beschleunigungs- und Bremsphase nicht möglich, einen einzigen Wert für die dB(A)-Reduktion zu benennen. Daher werden für die Ausgangsbeschleunigungs- und -bremskurven und die, aufgrund der Änderung der Zugfahrt, neuen Beschleunigungs- und Bremskurven jeweils zwei Trendlinien ermittelt. Diese werden integriert, sodass zwischen dem Beginn und dem Ende der jeweiligen Beschleunigungs- bzw. Bremsphase die Flächen unterhalb der Linie berechnet werden können. Durch Subtraktion der beiden Flächen ergibt sich die dB(A)-Reduktion für die gesamte Beschleunigungs- bzw. Bremsphase (siehe Tabelle 10-43). Diese wird auf einen Kilometer umgerechnet und für die Berechnung des monetären Nutzens (siehe Formel 9-65) verwendet.

Tabelle 10-43: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Modellzüge und Schallpegelminderung

Modellzugnummer	Anfahrzugkraft [%]	v_{max} [km/h]	Bremskraft [%]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•k m]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{Nutzen} / L_{Zug}$ [dB(A)]
1	100	100	100	-	-	-
20	85	80	85	-48,10	50	-1,00
39	100	90	-	-24,81	50	-0,50

Da im Rahmen der Schall 03 die Berechnung des Schallpegels nur für einen bestimmten Punkt vorgenommen werden kann und die Schallreduktionen der einzelnen Phasen der Szenarien bereits berechnet wurden, werden hier keine weiteren Berechnungsergebnisse dargestellt.

In Tabelle 10-44 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-44: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Modellzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
1 und 20	44	37	-7
1 und 39	44	40	-4

Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist generell überall ein- und umsetzbar, solange die oben beschriebenen Voraussetzungen erfüllt sind. Die Dauer bis zur Umsetzbarkeit ist als hoch zu bewerten, da zum einen zunächst die schallarmen Geschwindigkeitsprofile für die Strecken erarbeitet werden müssen. Zum anderen umfasst die Maßnahmenart eine lange Planungsphase, da die Trassenbestellungen aller EVU berücksichtigt werden müssen.

Kombinationsmöglichkeit

Wie bereits in Tabelle 9-13 dargestellt, ist die Maßnahmenart mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar. Es existieren also keine Einschränkungen hinsichtlich der Kombinierbarkeit.

Drei mögliche Kombinationsmöglichkeiten wurden mit den genannten Szenarien und deren Parametern (siehe Tabelle 10-43) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Anfahrzugkraft (85- 100 %), der Höchstgeschwindigkeit (80- 100 km/h) und der Bremskraft (85. 100 %), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen für einen langen Zug zwischen 0 und 36 und für einen kurzen Zug zwischen 0 und 18 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Modellzüge

Für die monetäre Bewertung wurden die Modellzüge mit den Nummern 20 und 39 (siehe Tabelle 10-45 und Anlage 19) ausgewählt, da sich bei diesen rechnerisch die größte Reduzierung der Nennleistung und des Schallpegels ergab.

Tabelle 10-45: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Modellzüge [€/d]	
	20	39
Kosten	4.049,60	-4.612,40
betriebliche Wirkung	-363.391,50	-15.938,30
Nutzen	2.289,50	1.822,40

Geschwindigkeitsprofil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung

Beschreibung

Die bisherige Zuglaufregelung und ihre Fahrempfehlungen werden allein auf der Grundlage des aktuellen Betriebsablaufs getroffen. Die Weiterentwicklung der Zuglaufregelung zielt darauf ab, auch die Reduktion des Schalls bei der Entscheidungsfindung miteinzubeziehen. Damit werden gleichzeitig eine Energieeinsparung und eine Schallreduktion erreicht. Welche Gewichtung die Reduzierung des

Energieverbrauchs und die Schallreduktion jeweils besitzen, muss festgelegt werden. Die Maßnahmenart kann dann mit dem Status quo der Zuglaufregelung verglichen werden und so der Nutzen und die betriebliche Wirkung festgestellt werden. Da die Maßnahmenart bisher nicht eingesetzt wird und die o. g. Gewichtung nicht festgelegt ist, wird der Regelzuschlag zur Anwendung einer Maßnahme zur Schallreduktion genutzt. Die Fahrzeit wird durch den Einsatz von einer oder mehreren Maßnahmen solange verlängert, bis der Regelzuschlag aufgebraucht ist. In Tabelle 10-46 sind die Regelzuschläge für Güterzüge und Triebfahrzeugfahrten dargestellt.

Tabelle 10-46: Regelzuschläge für Güterzüge und Triebfahrzeugfahrten (DB Netz AG 2009a)

v _{zul} [km/h]	Güterzug		Triebfahrzeug- fahrten
	Bremsstellung		
	G	P oder R	
≤ 80	5 %	3 %	3 %
80 < v ≤ 100		4 %	4 %
> 100		5 %	5 %

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Harmonisierung zwischen mehreren Zugfahrten nicht berücksichtigt.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU ist für die Erstellung und Übermittlung der Fahrempfehlungen an das EVU verantwortlich. Das EVU hat dann diese Empfehlungen entsprechend umzusetzen.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. So werden EVU belohnt, die die Weiterentwicklung der Zuglaufregelung bei der Planung und im Betrieb berücksichtigen. Demgegenüber könnte es verboten werden, ohne die Weiterentwicklung zu fahren.

Die Maßnahmenart kann im Betrieb zum Einsatz kommen. Das EIU legt z. B. fest, für welche Strecke diese eingesetzt wird und welche Gewichtung die Parameter erhalten. Dabei muss beachtet werden, dass je nach Strecke und Wahl der Parameter die Nennleistung beeinflusst wird. Die Züge, welche aufgrund einer geringeren Nennleistung nicht mehr auf der Strecke verkehren können, müssen dann entweder über andere Strecke umgeleitet werden oder ausfallen. Beide Möglichkeiten verursachen Kosten und sind demzufolge gegeneinander und in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abzuwägen. Die aufgrund der Zuglaufregelung gegebenen Empfehlungen müssen fahrbar sein. Eine Anwendung in der Fahrlagenplanung und Trassenanmeldung ist nicht sinnvoll, da die Empfehlungen aufgrund des aktuellen Betriebsablaufs getroffen werden sollten.

Im Rahmen der Maßnahmenart wird ein Güterzug mit den in Tabelle 10-2 dargestellten Einflussgrößen angenommen.

Die Länge des Streckenabschnitts beträgt 50 km und die Fahrzeit 31,50 min. Damit ergibt sich ein Regelzuschlag von 1,575 min (= 31,5 min • 0,05).

Kosten

Die Höhe der Kosten hängt von der oder den angewendeten Maßnahmen ab. Welche Maßnahmen angewendet werden können, wird durch die Höhe des Regelzuschlages beeinflusst. Dieser vergrößert sich in Abhängigkeit zur Fahrzeit des Zuges. Aufgrund der Höhe des Regelzuschlages (s. o.) werden die Maßnahmen „Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (95 km/h)“ und „Auslaufen – Auslaufen nutzen (auf 70 km/h)“ angewendet.

Die Kosten bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich somit aus der Veränderung der Fahrzeit und der Nennleistung. Zum einen sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz. Dies führt zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen. Zum anderen ergibt sich durch die Verringerung der Nennleistung ein geringerer Gewinn.

Allerdings führt die Änderung der Geschwindigkeit zu einem veränderten Energieverbrauch.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der zu fahrenden Geschwindigkeit sind.

Betriebliche Wirkung

Wie bereits beschrieben muss auf Grund der verringerten Höchstgeschwindigkeit die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt. Die sich ergebenden Nennleistungen sind in Anlage 20 dargestellt.

Nutzen

Der Nutzen ergibt sich aus der Anwendung der zwei genannten Maßnahmen. Bei beiden wird die Geschwindigkeit verringert und die Fahrzeit erhöht. In Tabelle 10-47 sind die erreichten Schallpegelminderungen dargestellt.

Tabelle 10-47: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Modellzüge und Schallpegelminderung

Maßnahme	v_{\max} [km/h]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•k m]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{\text{Nutzen}} / L_{\text{Zug}}$ [dB(A)]
keine	100	-	-	-
Beharren	95	-0,3	50	-0,3
Auslaufen	70	-3,85	3,9	-1,00

Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Tabelle 10-48 und Anlage 20) geht hervor, dass beim Auslaufen die größte Schallreduktion erreicht wird. Dies ist jedoch zu relativieren, da diese Reduktion nur am Ende des Auslaufens und aufgrund der Geschwindigkeitsverringering entsteht. Durch die schon beschriebene Integration über die Einsatzlänge der Maßnahme (= 3,9 km) ergibt sich eine Reduktion von -1,00 dB(A). Beim Beharren beträgt die Schallreduktion -0,3 dB(A).

Diese muss nicht integriert werden, da die Reduktion auf jedem Kilometer des Streckenabschnitts erreicht wird. Dadurch wird ein höherer Nutzen gegenüber dem Auslaufen erreicht.

Tabelle 10-48: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse (Auszug)

Maßnahme	v_{\max} [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
keine	100	0	36	112,12	-
Beharren	95			111,82	-0,3
Auslaufen	70			110,22	-1,9

In Tabelle 10-49 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-49: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Maßnahme	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
Beharren	44	42	-2
Auslaufen	44	34	-10

Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist generell überall ein- und umsetzbar, solange eine entsprechende Planung des EVU und eine Festlegung der Gewichtung hinsichtlich der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Schallreduktion seitens des EIU erfolgt. Die Dauer bis zur Umsetzbarkeit ist als hoch zu bewerten. Zum einen umfasst die Maßnahmenart eine lange Planungsphase, da die bestehende Zuglaufregelung weiterentwickelt werden muss. Zum anderen müssen die Strecken, Zuschläge und die passenden Maßnahmenarten ermittelt werden.

Kombinationsmöglichkeit

Die Maßnahmenart ist mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar. Es existieren also keine Einschränkungen.

Eine mögliche Kombination wurde bereits mit den verschiedenen Zugkonfigurationen und deren Parametern (siehe Tabelle 10-48) untersucht. Dort wurde, in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit (70- 100 km/h), die Wagenanzahl mit LL-Sohlen bzw. GG-Sohlen zwischen 0 und 36 Wagen variiert und die zugehörigen Schallpegel berechnet.

Monetäre Bewertung für Maßnahmen

Für die monetäre Bewertung wurden für die zwei genannten Maßnahmen die Kosten, die betriebliche Wirkung und der Nutzen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10-50 dargestellt.

Tabelle 10-50: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Maßnahme [€]	
	Beharren	Auslaufen
Kosten	1.561,90	-1.803,20
betriebliche Wirkung	-107.584,80	-63.185,70
Nutzen	1.138,90	276,00

10.3.3 Umleitung

Umfahren von Lärmhotspots

Beschreibung

Mit der Maßnahmenart umfahren Züge Lärmhotspots. Dadurch werden Züge bewusst an bestimmten Regionen vorbeigeleitet. Somit entstehen zum einen „Ruheregionen“ und zum anderen „Schallregionen“. In den jeweiligen Regionen herrscht entweder wenig Verkehr und damit ein geringer Schallpegel oder viel Verkehr und damit ein hoher Schallpegel. Auf diese Weise soll bewusst für bestimmte Regionen das Schallniveau gesenkt bzw. gehoben werden. Das wesentliche Kriterium zur Einrichtung der Regionen ist die Anzahl der be- bzw. entlasteten Personen.

Dimensionen

Die Adressaten der Maßnahmenart sind EIU und EVU. Das EIU legt die Ruhe- bzw. Schallregionen im Netz anhand von Schallpegeln fest und definiert die zugehörigen Umleitungstrecken. Die Umleitungstrecken werden dann von EVU genutzt.

Die Maßnahmenart ist nicht an eine bestimmte Tageszeit oder einen bestimmten Ort gebunden und kann daher immer und überall angewendet werden. Besonders bietet sich der Einsatz in den Abend- und Nachtstunden an, um ein geringeres Schallniveau zu erreichen. Sinnvoll ist es ebenfalls, die Maßnahmenart in bewohntem Gebiet einzusetzen, um bei möglichst vielen Betroffenen einen positiven Nutzen zu erzielen.

Die Anwendung der Maßnahme kann durch das EIU mit einem Anreiz versehen werden. EVU, die eine bestimmte Umleitungstrecke bei der Planung und gegebenenfalls im Betrieb berücksichtigen, könnten belohnt werden. Demgegenüber könnte es verboten werden, eine bestimmte Strecke mit z. B. lauten Zügen zu befahren.

Da die Maßnahmenart die Fahrzeit beeinflusst, sollte diese vorwiegend in der Fahrlagenplanung und der Trassenanmeldung eines EVU stattfinden. Das EIU könnte im Netz Ruhe- bzw. Schallregionen festlegen. Dadurch wird festgelegt, welche Strecken weniger und welche Strecken mehr belastet werden. Dabei muss beachtet werden, dass mit zunehmender Länge der Umleitungstrecke die Fahrzeit der Züge erhöht wird. Ebenfalls muss die Nennleistung unter Berücksichtigung einer Maßnahme und die Nennleistung ohne Anwendung einer betrieblichen Maßnahme betrachtet werden. Durch die Umleitung eines Zuges pro Tag und Richtung steigt die Nennleistung auf der Ausgangsstrecke, da dort ein Zug weniger verkehrt. Demgegenüber sinkt die Nennleistung auf der Umleitungstrecke, da dort ein Zug pro Tag und Richtung mehr verkehrt. Sollten die Züge auf der Umleitungstrecke nicht mehr aufgenommen werden können, müssen diese entweder über andere Strecken geleitet werden oder ausfallen. Unabhängig von der Wahl der Umleitungstrecke entstehen Kosten, die in Bezug auf die Anwendung der Maßnahme abgewogen werden müssen. Der erstellte

Fahrplan muss fahrbar sein und die umgeleiteten Züge entsprechend beinhalten. Eine Anwendung im Betrieb ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch der Fahrplan nicht beeinträchtigt wird und das betroffene EVU keine Einwände bezüglich der Umleitung hat. Die Einrichtung einer Umleitungsstrecke bietet sich auf Strecken mit geringer Zugzahl und wenig Betroffenen an. Aufgrund der langfristigen Planung der Fahrlagen der Züge ist eine Änderung der Fahrlage eines Zuges nur mit hohem Aufwand und damit verbundenen Kosten möglich.

Im Rahmen der Maßnahmenart wird ein Güterzug mit den in Tabelle 10-2 dargestellten Einflussgrößen angenommen.

In Tabelle 10-51 sind die Fahrzeiten der Ausgangsstrecke (50 km) und der Umleitungsstrecke (75 km) für alle Zuggattungen dargestellt.

Tabelle 10-51: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Fahrzeiten der Ausgangsstrecke und Umleitungsstrecke

Zuggattung	Fahrzeit [min]	
	Ausgangsstrecke	Umleitungsstrecke
SPFV: IC/EC	19,50	29,25
SPNV: RB/RE	22,07	33,11
SGV: Ganzzug	31,50	47,25

Auf die Bildung eines Faktors aus realen Streckendaten für die zusätzliche Länge der Umleitungsstrecke wird verzichtet, da sowohl die Umleitungsstrecken als auch die zugehörigen Ausgangsstrecken sehr unterschiedliche Längen aufweisen. Stattdessen wird die Länge der Umleitungsstrecke mit dem 1,5-fachen der Ausgangsstrecke angenommen. Dieser Faktor kann sich in der Realität, aufgrund des oben beschriebenen Sachverhalts, anders darstellen.

Kosten

Die Kosten setzen sich folgendermaßen zusammen:

- Ausgangsstrecke: Kostensenkung, da ein Zug weniger verkehrt
- Umleitungsstrecke: Kostenerhöhung, da ein Zug mehr verkehrt
- Beide Strecken: Kostenerhöhung für einen Zug, da dieser umgeleitet wird

Die Kostenerhöhung des einen Zuges ergibt sich vorwiegend aus der Verlängerung der Fahrzeit aufgrund der Nutzung der Umleitungsstrecke. Dabei sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz, was zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen führt.

Die verlängerte Fahrzeit führt ebenfalls zu einem Mehrverbrauch an Energie.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von den zu befahrenden Strecken sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund der Umleitung eines Güterzuges pro Tag und Richtung verändern sich die Nennleistungen der Strecken. Eine Anpassung der Nennleistungen ist jedoch nicht erforderlich, da lediglich ein Güterzug pro Tag und Richtung umgeleitet wird und der Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) weiterhin erreicht wird. Die Nennleistungen für die Ausgangsstrecke und die Umleitungsstrecke sind in Anlage 21 dargestellt.

Nutzen

Der Nutzen der Maßnahmenart ergibt sich aus der Berechnung des Schallpegels für die verschiedenen Zugzahlen. Auf der Ausgangsstrecke verkehrt ein Zug weniger, auf der Umleitungsstrecke verkehrt ein Zug mehr. Mit der errechneten mittleren Mindestzugfolgezeit von 3,81 min (siehe Kapitel 10.2.2) könnten in einer Stunde 15,7 Züge pro Richtung verkehren. Da dies der Maximalwert ist und demzufolge eine weitere Steigerung nicht möglich ist, werden 10 Züge pro Stunde und Richtung angenommen. In Tabelle 10-52 sind die angenommenen Zugzahlen pro Stunde und die jeweiligen Schallpegel dargestellt.

Tabelle 10-52: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Schallpegel für Ausgangs- und Umleitungsstrecke

Maßnahme	Anzahl Züge pro Stunde	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
Ausgangsstrecke	10	122,12	-
	9	121,67	-0,45
Umleitungsstrecke	10	122,12	-
	11	122,54	+0,42

Aus den Ergebnissen der Schallberechnung nach Schall 03 (siehe Tabelle 10-52) geht hervor, dass die Reduktion bzw. Erhöhung des Pegels fast gleich ist.

In Tabelle 10-53 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 10-53: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Maßnahme	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
Ausgangsstrecke	169	161	-8
Umleitungsstrecke	169	178	+9

Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist generell überall ein- und umsetzbar, solange die oben beschriebenen Voraussetzungen erfüllt sind. Die Dauer bis zur Umsetzbarkeit ist als hoch zu bewerten, da zum einen zunächst die Umleitungsstrecken definiert werden müssen. Zum anderen umfasst die Maßnahmenart eine lange Planungsphase, da die Trassenbestellungen aller EVU berücksichtigt werden müssen.

Kombinationsmöglichkeit

Wie bereits in Tabelle 9-13 dargestellt, ist die Maßnahmenart mit allen anderen Maßnahmenarten kombinierbar. Es existieren also keine Einschränkungen hinsichtlich der Kombinierbarkeit.

Monetäre Bewertung für Umleitung

Für die monetäre Bewertung wurden für die Ausgangsstrecke und die Umleitungstrecke die Kosten, die betriebliche Wirkung und der Nutzen für die Umleitung eines Güterzuges berechnet und miteinander verrechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10-54 und Anlage 21 dargestellt.

Tabelle 10-54: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Monetäre Bewertung für Umleitung [€]
Kosten	288,10
betriebliche Wirkung	11.976,70
Nutzen	-904,50

10.4 Zusammenfassung

Mit der in diesem Kapitel enthaltenen Beschreibung der Einflussgrößen, der Maßnahmenarten und der zugehörigen Maßnahmen sowie der Anwendung der Formeln zur monetären Bewertung können im folgenden Kapitel die Nutzen-Kosten-Verhältnisse gebildet werden. Für jede Maßnahmenart wurden beispielhafte Einsatzfälle beschrieben und mit den Bewertungskriterien (Kosten, betriebliche Wirkung und Nutzen) monetär bewertet.

Es ist zu beachten, dass die dargestellten monetären Bewertungen der jeweiligen Maßnahmenart und deren Maßnahmen von den genannten Einflussgrößen (siehe Kapitel 10.2) abhängen. Dies betrifft sowohl die angenommene Beispielstrecke (siehe Abbildung 10-1) als auch die Einflussgrößen zur Berechnung der Fahr- und Mindestzugfolgezeiten (siehe Tabelle 10-2) und die gewählten Modellzugparameter (siehe Maßnahmenarten). Des Weiteren sind die in Kapitel 9.2 dargestellten Kostensätze zu beachten. Ergeben sich hier Änderungen, resultieren daraus geänderte Kosten bei Anwendung der Maßnahme. Insgesamt ändert sich dadurch das jeweilige Nutzen-Kosten-Verhältnis.

11 Detaillierte Bewertung der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten

11.1 Einleitung

Nachdem in Kapitel 9 das Schema für die detaillierte Bewertung entwickelt und in Kapitel 10 die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten beschrieben wurden, wird in diesem Kapitel die detaillierte Bewertung dieser durchgeführt. Es ergeben sich somit Maßnahmenarten, deren Einsatz gerechtfertigt ist und Maßnahmenarten, die nicht zum Einsatz kommen sollten. Das Kriterium hierfür ist ein Nutzen-Kosten-Verhältnis größer oder gleich eins. Somit erfolgt eine Reduzierung der Anzahl der Maßnahmenarten, welche eingesetzt werden sollten.

11.2 Methode

Für jede untersuchte Maßnahmenart wurde mit Hilfe der Formeln der Kapitel 9.2 (Kosten bei Anwendung einer Maßnahme), 9.3 (monetärer Wert der betrieblichen Wirkung einer Maßnahme) und 9.4 (monetärer Wert des Nutzens einer Maßnahme) ein Nutzen-Kosten-Verhältnis gebildet. Das Nutzen-Kosten-Verhältnis ist das Verhältnis des monetären Nutzens einer Maßnahme zu den Gesamtkosten einer Maßnahme. Die Gesamtkosten einer Maßnahme errechnen sich aus den Kosten bei der Anwendung abzüglich der Änderung des Gewinns. Die Änderung des Gewinns (siehe Formel 9-47) ergibt sich aus der Kostenverringerung abzüglich der Erlösminderung und wird im Rahmen der betrieblichen Wirkung berechnet.

Idealerweise sollte das Nutzen-Kosten-Verhältnis größer oder gleich eins sein, um einen wirtschaftlichen Vorteil nach der Anwendung einer Maßnahme zu erhalten. In diesem Fall ist der monetäre Nutzen größer oder gleich den Kosten bei Anwendung einer Maßnahme. Dies ist bei Maßnahmen mit einem Wert kleiner eins nicht der Fall. Daher sollten diese nicht zum Einsatz kommen. Für jede Maßnahmenart und deren Maßnahmen können nun Verhältnisse berechnet werden.

11.3 Ergebnisse

Nachdem die Nutzen-Kosten-Verhältnisse der untersuchten Maßnahmenarten und deren Maßnahmen ermittelt wurden, ergeben sich folgende Anzahlen der Bewertung:

- Größer oder gleich eins: 4 Maßnahmen
- Kleiner eins: 19 Maßnahmen

Die Verhältnisse schwanken dabei zwischen den Werten 4,4 (Änderung des Wagenzuges – Modellzug 48) und 0,0003 (Fahrzeitveränderung – Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit – Modellzug 15).

Somit könnten 4 Maßnahmen wirtschaftlich angewendet und 19 Maßnahmen nicht wirtschaftlich angewendet werden. In Tabelle 11-1 sind die Nutzen-Kosten-Verhältnisse der untersuchten Maßnahmen dargestellt.

Bezüglich der Maßnahme „Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen“ ist festzustellen, dass mit den dargestellten Formeln ein negativer Nutzen erzielt wird. Dies ist auf die Erhöhung der Geschwindigkeit und der Maßgabe, dass eine Maßnahmenart zur Schallreduktion beitragen soll, zurückzuführen. Die Formeln wurden trotzdem verwendet, um die Konsistenz zu den anderen Maßnahmenarten sicherzustellen. Des Weiteren ergeben sich für diese Maßnahmenarten positive

Nutzen-Kosten-Verhältnisse. Dies ist auf die Berechnung des Verhältnisses (siehe Formel 11-1) zurückzuführen.

$$NKV = \frac{N}{K_{Gesamt}} = \frac{N}{(K_{Maßnahme} - \Delta G)} = \frac{N}{[K_{Maßnahme} - (K_{Reduktion} - E)]} \quad 11-1$$

Dabei sind:

- NKV Nutzen-Kosten-Verhältnis [-]
- N monetärer Nutzen einer Maßnahme [€]
- K_{Gesamt} Gesamtkosten einer Maßnahme [€]
- $K_{Maßnahme}$ Kosten bei Anwendung einer Maßnahme [€]
- ΔG Änderung des Gewinns = betriebliche Wirkung [€]
- $K_{Reduktion}$ Kostenverringerung aufgrund des Ausfalls von Zügen [€]
- E Erlösminderung

Im Falle der Erhöhung der Geschwindigkeit ergibt sich für die Kosten bei Anwendung einer Maßnahme ein negativer Wert. Gleichzeitig wird der Wert für die Änderung des Gewinns positiv, da mehr Züge verkehren können. Durch Subtraktion der beiden Werte wird der Nenner negativ. Aufgrund des negativen Wertes für den Nutzen (s. o.) ergibt sich ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis.

Im Rahmen von zukünftigen Arbeiten, sollten speziell diejenigen Maßnahmen, welche ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von kleiner eins haben, genauer untersucht werden. Gegebenenfalls können Maßnahmen unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich angewendet werden. Dies gilt auch für Maßnahmenarten, die nach der Grobbewertung nicht weiter untersucht wurden. Somit muss eine Berechnung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses für jede einzelne Lokalität erfolgen, „es sei denn, Kosten und Nutzen der Betroffenen seien in allen Lokalitäten annähernd die gleichen“ (Kloepfer et al. 2006). Dies ist schon allein aufgrund der Größe des Schienennetzes in Deutschland nicht der Fall. Somit können mehrere Optima ausgemacht werden, die von den jeweiligen vorliegenden Voraussetzungen abhängen.

Tabelle 11-1: Nutzen-Kosten-Verhältnisse der untersuchten Maßnahmenarten

Maßnahmenart	Modellzugnummer	N-K-Verhältnis
Änderung des Wagenzuges: nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen	19	3,6
	38	2,4
	48	4,4
	58	2,8
Beschleunigen: geringere Beschleunigung	4	0,01
	15	0,001
	33	0,001
	48	0,0002
Beschleunigen: geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})	7	0,0003
	15	0,0001
Beharren: Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen	15	0,02
	35	0,02
Beharren: geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})	7	0,01
	21	0,01
Auslaufen: Auslaufen nutzen	7	0,005
	21	0,01
Bremsen: geringere Beschleunigung	11	0,01
	33	0,002
Geschwindigkeitsprofil: schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)	20	0,01
	39	0,2
Geschwindigkeitsprofil: Weiterentwicklung der Zuglaufregelung	Beharren	0,01
	Auslaufen	0,004
Umleitung: Umfahren von Lärmhotspots	-	0,1

11.4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der detaillierten Bewertung wurde eine Einschätzung hinsichtlich der wirtschaftlichen Realisierbarkeit der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten getroffen. Dabei weisen 4 Maßnahmenarten ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von größer oder gleich eins auf. Dies steht in Verbindung mit den gewählten Einflussgrößen der angenommenen Beispielstrecke und den verwendeten Formeln. In diesem Fall ist die Aussagekraft als hoch einzuschätzen. Sollten sich Änderungen ergeben, wird sich auch das Nutzen-Kosten-Verhältnis ändern. Dies könnte zur Folge haben, dass Maßnahmenarten, die bisher nicht anwendenswert erscheinen, dann wirtschaftlich angewendet werden können. Ebenfalls ist der umgekehrte Fall denkbar, dass Maßnahmenarten aufgrund von z. B. Änderungen der Einflussgrößen nicht mehr wirtschaftlich angewendet werden können. Es ist also im Einzelfall zu prüfen, ob eine Maßnahmenart angewendet werden kann.



12 Beispielhafte Untersuchung der Maßnahmenarten

12.1 Einleitung

Nachdem in Kapitel 11 die detaillierte Bewertung der Maßnahmenarten durchgeführt wurde, werden diese auf einer realen Strecke beispielhaft untersucht. Bisher wurden die Maßnahmenarten einzeln auf einer fiktiven Beispielstrecke betrachtet und damit das Nutzen-Kosten-Verhältnis gebildet. Mit der Verwendung von realen Streckendaten entsteht hinsichtlich der Auswirkung einer Maßnahme ein Mehrwert für einen potenziellen Anwender, da die Einflussgrößen nun die Praxis besser abbilden. Auf der realen Strecke werden mehrere Maßnahmenarten gleichzeitig eingesetzt.

Ziel des Kapitels ist die beispielhafte Untersuchung der Maßnahmenarten auf einer realen Strecke und die Darstellung der Auswirkungen bei der Anwendung bestimmter Maßnahmen.

12.2 Auswahl der realen Strecke

Zur Auswahl der realen Strecke wurden mit Hilfe eines Brainstormings zusammen mit der DB Netz AG am 05.09.2016 folgende Anforderungen festgelegt:

- hohes Verkehrsaufkommen in der Nacht
- Mischverkehrsstrecke
- 2-gleisige Strecke
- Umleitungsmöglichkeit

Aufgrund der oben genannten Anforderungen wurden zusammen mit der DB Netz AG folgende Strecken identifiziert:

- Koblenz Hbf ↔ Budenheim (Streckennummern: 2630/3510)
- Eltville ↔ Niederlahnstein (Streckennummern: 3507)
- Bebra ↔ Fulda (Streckennummer: 3600)
- Nürnberg Hbf ↔ Regensburg Hbf (Streckennummer: 5850)

In Anlage 22 ist für jede der genannten Strecken ein Steckbrief abgebildet.

Für die weitere Berechnung sind folgende Eigenschaften der Strecken wichtig:

- Streckenlänge
- Maximale Steigung
- Maximales Gefälle
- Zulässige Geschwindigkeit des Schienengüterverkehrs

Aus der Streckenlänge und der zulässigen Geschwindigkeit des Schienengüterverkehrs wird die Fahrzeit berechnet. Diese wird durch die maximale Steigung bzw. das maximale Gefälle beeinflusst. Nehmen diese sehr hohe Werte an bzw. besteht eine Strecke nur aus einer Steigung oder nur aus einem Gefälle ergeben sich entsprechend andere Fahrzeiten gegenüber einer Strecke ohne Steigungen und Gefälle.

Aufgrund der Steigungen und Gefälle der Strecke Bebra ↔ Fulda, welche relativ hoch sind aber nicht den Maximalwert der identifizierten Strecken darstellen, wird diese als reale Strecke für die Untersuchung der Anwendung der Maßnahmen ausgewählt und im folgenden Kapitel kurz beschrieben.

12.3 Strecke Bebra ↔ Fulda

Die Strecke Bebra ↔ Fulda ist eine zweigleisige, elektrifizierte Eisenbahnstrecke. Sie verläuft in Nord-Süd-Richtung und stellt nach der Eröffnung der Schnellfahrstrecke Hannover – Würzburg eine wichtige Güterverkehrsverbindung dar. Neben dem Schienengüterverkehr wird die Strecke auch vom Schienenpersonennahverkehr befahren und als Umleitungsstrecke für den Schienenpersonenfernverkehr genutzt. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit beträgt 160 km/h. (Schweers et al. 2017)

Die jeweiligen Neigungen wurden von der DB Netz AG übermittelt und sind nachfolgend aufgeführt:

- Maximale Steigung:
 - Richtung Fulda: 9,4 ‰
 - Richtung Bebra: 11,5 ‰
- Maximales Gefälle:
 - Richtung Fulda: 11,8 ‰
 - Richtung Bebra: 9,5 ‰

12.4 Eigenschaften der Zugfahrt

Für die Strecke Bebra ↔ Fulda liegen die Fahrzeit für einen Güterzug und die Zugeigenschaften vor. Die von der DB Netz AG übergebenen Eigenschaften gelten für beide Richtungen und sind in Tabelle 12-1 dargestellt.

Tabelle 12-1: Eigenschaften des Güterzuges

Triebfahrzeug [-]	E-Lok
Baureihe [-]	185
Zugmasse [t]	685,0
Zuglänge [m]	419,0
Bremsweg [m]	1.000
Zul. Geschwindigkeit [km/h]	100
Bremsverzögerung [m/s ²]	0,35

Die Eigenschaften sind in diesem Fall nicht gewählt, sondern bilden eine reale Zugfahrt ab. Dies hat zur Folge, dass die folgenden Berechnungen und deren Ergebnisse nur dann gelten, wenn ein weiterer untersuchter Zug ebenfalls diese Eigenschaften aufweist. Dabei ist festzustellen, dass die Lokomotive der Baureihe 185 bei Güterzügen recht häufig eingesetzt wird. Eine Aussage zur Zugmasse und –länge ist nicht möglich, da eine Verteilung über alle im Netz der Deutschen Bahn AG verkehrenden Güterzüge nicht vorliegt. Der Bremsweg, die zulässige Geschwindigkeit und die Bremsverzögerung sind typische Werte für einen Güterzug.

Mit der Länge von 419 m kann die Wagenanzahl nach Formel 12-1 berechnet werden.

$$L_{\text{Zug}} = L_{\text{Lok}} + (n_{\text{Wagen}} \cdot L_{\text{Wagen}}) \Rightarrow n_{\text{Wagen}} = \frac{L_{\text{Zug}} - L_{\text{Lok}}}{L_{\text{Wagen}}} = \frac{419\text{m} - 20\text{m}}{20\text{m}} \approx 20 \quad 12-1$$

Dabei sind:

- L_{Zug} Gesamtlänge des Zuges [m]
- L_{Lok} Länge der Lok (≈ 20 m)
- n_{Wagen} Wagenanzahl des Zuges [-]
- L_{Wagen} Länge eines Wagens (≈ 20 m, Angabe DB Netz AG vom 05.09.2016)

Von der DB Netz AG wurden folgende Fahrzeiten und Streckenlängen übermittelt:

- Bebra \rightarrow Fulda: 37,2 min und ca. 56 km (Betriebsstellenmitte zu Betriebsstellenmitte)
- Fulda \rightarrow Bebra: 36,5 min und ca. 56 km (Betriebsstellenmitte zu Betriebsstellenmitte)

Für die Untersuchung der Maßnahmenarten werden eine Fahrzeit von 37 min und eine Streckenlänge von 56 km, unabhängig von der Fahrtrichtung, gewählt.

Der Regelzuschlag beträgt für beide Richtungen jeweils 4 %. Die Bau- und Biegezuschläge werden nicht berücksichtigt.

Halte sind auf dem betrachteten Streckenabschnitt nicht vorgesehen. Ebenso wird das Auslaufen nicht angewendet. Somit ergibt sich, unabhängig von der Fahrtrichtung, folgender Fahrtverlauf:

- Beschleunigung von 0 auf 100 km/h
- Beharren mit 100 km/h
- Bremsen von 100 auf 0 km/h

Der Fahrtverlauf wurde ebenfalls aus den zur Verfügung gestellten Daten abgelesen. Aufgrund des Beschleunigens aus dem Stand und des Bremsens bis zum Halt, könnten die Ergebnisse der Untersuchung der Maßnahmenarten verfälscht werden und so das Nutzen-Kosten-Verhältnis beeinflusst werden.

12.5 Auswahl der Maßnahmenarten

In Kapitel 11 wurden für Maßnahmenarten Nutzen-Kosten-Verhältnisse gebildet (siehe Tabelle 11-1). Unabhängig davon, ob die ermittelten Verhältnisse größer oder kleiner eins sind, wurde eine Rangfolge gebildet. Die Maßnahmenart des 1. („Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen“) und des 2. Ranges („Geschwindigkeitsprofil: schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren“) werden im Rahmen dieses Kapitels untersucht. Neben den genannten Maßnahmenarten wird zum Vergleich noch eine etwas schlechter platzierte Maßnahmenart („Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung“) untersucht.

Die Maßnahmenarten werden nacheinander an jeweils einem Zug je Richtung eingesetzt.

12.5.1 Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Bremsen und keine...

Aus den übermittelten Daten der DB Netz AG geht nicht hervor, welche Bremssohlen die Wagen des Güterzuges besitzen. Es wird daher davon ausgegangen, dass GG-Sohlen eingesetzt werden. Die Anwendung der Maßnahme ersetzt diese komplett durch LL-Sohlen. Dadurch wird eine Schallreduktion gegenüber der Ausgangssohlenart erreicht.

Kosten

Bei Anwendung der Maßnahme ergeben sich Kostenänderungen bei der Instandhaltung der Güterwagen. Die Verbundstoff-Klotzbremsen müssen öfter gewartet werden als die Grauguss-Klotzbremsen. Des Weiteren sind Ersatzteile für die Verbundstoff-Klotzbremsen kostenintensiver gegenüber Grauguss-Klotzbremsen. (BMVI 2016a), (UBA 2017a)

In Tabelle 10-10 sind die verwendeten Parameter zur Berechnung der Instandhaltungskosten der Güterwagen dargestellt. Die übrigen Parameter zur Kostenberechnung sind unabhängig von der Sohlenart und nehmen dieselben Werte an.

Weitere Kostenänderungen ergeben sich bei Einsatz der Maßnahmenart nicht, da lediglich die lauten durch leise Wagen ersetzt werden.

Betriebliche Wirkung

Da davon ausgegangen wird, dass sich durch den Einsatz von Wagen mit LL-Sohle anstatt Wagen mit GG-Sohle die Höchstgeschwindigkeit des Zuges nicht ändert, ergeben sich keine Änderungen hinsichtlich der Nennleistung. Daher ergeben sich keine zusätzlichen Kosten.

Nutzen

Die Berechnung des Schallpegels wurde jeweils für einen Zug mit Wagen mit GG-Sohlen und LL-Sohle durchgeführt. Der Güterzug mit GG-Sohlen stellt dabei den Ausgangsfall ohne Anwendung der Maßnahme dar. In Tabelle 12-2 sind die jeweiligen Schallpegel und die Schallreduktion dargestellt.

Tabelle 12-2: Änderung des Wagenzuges: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse

Güterzug	v_{\max} [km/h]	Wagenanzahl mit LL-Sohle [-]	Wagenanzahl mit GG-Sohle [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
GG-Sohle	100	0	20	109,60	-
LL-Sohle		20	0	104,86	-4,74

In Tabelle 12-3 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 12-3: Änderung des Wagenzuges: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Güterzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
GG- und LL-Sohle	31	17	-14

Monetäre Bewertung für Modellzug

In Tabelle 12-4 sind die Ergebnisse der monetären Bewertungskriterien (Kosten, betriebliche Wirkung und Nutzen) und das Nutzen-Kosten-Verhältnis für eine Richtung dargestellt.

Tabelle 12-4: Änderung des Wagenzuges: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	LL-Sohle
Kosten [€/d]	264,50
betriebliche Wirkung [€/d]	-
Nutzen [€/d]	1.053,30
N-K-Verhältnis [-]	4,0

12.5.2 Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung

Aus den bereitgestellten Daten der DB Netz AG lässt sich eine Bremsverzögerung von $0,35 \text{ m/s}^2$ ablesen. Dieser Wert wird im Rahmen der Maßnahmenart um 50 % verringert, sodass der Zug mit $0,175 \text{ m/s}^2$ bremst. Dadurch wird die Bremsphase verlängert und gleichzeitig die Beharrungsphase verkürzt. Durch die verringerte Bremsverzögerung und der damit gleichzeitig verringerten Geschwindigkeit wird eine Schallreduktion erreicht.

Kosten

Die Kosten ergeben sich vorwiegend aus der Verlängerung der Fahrzeit. Dabei sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz, was zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkungen führt.

Durch die verringerte Bremsverzögerung werden Einsparungen beim Energieverbrauch erreicht, da die Bremsphase eher beginnen muss und sich somit die Dauer der Beharrungsphase verringert.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der anzusetzenden Beschleunigung sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund der verringerten Bremsbeschleunigung muss die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_0 von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt.

Nutzen

Die Berechnung des Schallpegels wurde jeweils für einen Zug mit der Ausgangsbremsverzögerung und der variierten Bremsverzögerung durchgeführt. Der Güterzug mit der Ausgangsbremsverzögerung stellt dabei den Fall ohne Anwendung der Maßnahme dar.

Da für die Ausgangsbremsverzögerung die Dauer des Bremsvorgangs von 100 auf 0 km/h bekannt ist, konnte mit diesem und der verringerten Verzögerung zurückgerechnet werden und so die verminderten Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt, an dem eingangs 100 km/h gefahren wurden, bestimmt werden. Somit ergibt sich für die variierte Bremsverzögerung eine Geschwindigkeit von 50 km/h.

Wie in Kapitel 9.4 beschrieben ist es aufgrund der sich ändernden Geschwindigkeiten während der Bremsphase nicht möglich, einen einzigen Wert für die dB(A)-Reduktion zu benennen. Daher werden für die Ausgangsbremskurve und die, aufgrund der Änderung der Bremsverzögerung, neue Bremskurve zwei Trendlinien ermittelt. Diese werden integriert, sodass zwischen dem Beginn und dem Ende der jeweiligen Bremsphase die Flächen unterhalb der Linie berechnet werden können. Durch Subtraktion der beiden Flächen ergibt sich die dB(A)-Reduktion für die gesamte Bremsphase (siehe Tabelle 12-5). Diese wird auf einen Kilometer umgerechnet und für die Berechnung des monetären Nutzens (siehe Formel 9-65) verwendet.

Tabelle 12-5: Fahrzeitveränderung: Modellzüge und Schallpegelminderung

Güterzug	Bremskraft [%]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•km]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{\text{Nutzen}} / L_{\text{Zug}}$ [dB(A)]
Ausgangsbremskraft	100	-	-	-
Varierte Bremskraft	50	-3,14	2,2	-1,40

In Tabelle 12-6 sind die Ergebnisse der Schallberechnung nach Schall 03 dargestellt. Da die Emissionen der Bremsen in der Schall 03 nicht berücksichtigt werden, kann kein Vergleich der Schallpegel bei voller und verminderter Verzögerung erfolgen. Es wird angenommen, dass die Emissionen des Bremsens sehr gering in Bezug auf den Gesamtschallpegel sind. Die Reduktion des Pegels wird daher größtenteils durch die Geschwindigkeitsverringerng erreicht.

Tabelle 12-6: Fahrzeitveränderung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse

Güterzug	Bremskraft [%]	Bremsen aus [km/h]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
Ausgangsbremskraft	100	100	109,60	-
Varierte Bremskraft	50	50	106,31	-3,29

In Tabelle 12-7 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 12-7: Fahrzeitveränderung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Güterzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
Abstände [m]	31	22	-9

Monetäre Bewertung für Modellzug

In Tabelle 12-8 sind die Ergebnisse der monetären Bewertungskriterien (Kosten, betriebliche Wirkung und Nutzen) und das Nutzen-Kosten-Verhältnis für beide Richtungen dargestellt.

Tabelle 12-8: Fahrzeitveränderung: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Geschwindigkeitsprofil
Kosten [€/d]	-3.184,10
betriebliche Wirkung [€/d]	-32.904,80
Nutzen [€/d]	9,40
N-K-Verhältnis [-]	0,0003

12.5.3 Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschw.-profil...

Im Rahmen der Maßnahmenart wird ein schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgegeben und so eine Schallreduktion erreicht. Dadurch entfallen die Beschleunigungs- und Bremsphasen, da der Zug den Streckenabschnitt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 90 km/h durchfährt.

Kosten

Die Kosten ergeben sich vorwiegend aus der Veränderung der Fahrzeit. Dabei sind das Personal, die Triebfahrzeuge sowie die Wagen länger im Einsatz, was zu höheren Kosten gegenüber der Zugfahrt ohne Einschränkung führt.

Durch den Wegfall von Beschleunigungs- und Bremsphasen werden Einsparungen beim Energieverbrauch erreicht.

Die Kosten für die Fahrlagenplanung können vernachlässigt werden, da diese unabhängig von der zu fahrenden Geschwindigkeit sind.

Betriebliche Wirkung

Aufgrund der verringerten Höchstgeschwindigkeit muss die Nennleistung angepasst werden, um weiterhin den Qualitätsfaktor q_Q von 1,0 (siehe Kapitel 9.3) zu erreichen. Dies wurde mit einem iterativen Prozess durchgeführt.

Nutzen

Die Berechnung des Schallpegels wurde jeweils für die Ausgangszugfahrt und die konstante Fahrt durchgeführt. Die Ausgangszugfahrt stellt dabei den Fall ohne Anwendung der Maßnahme dar.

Wie in Kapitel 9.4 beschrieben ist es aufgrund der sich ändernden Geschwindigkeiten während der Beschleunigungs- und Bremsphase nicht möglich, einen einzigen Wert für die dB(A)-Reduktion zu benennen. Daher werden jeweils für die Beschleunigungs-, Beharrungs- und Bremsphase der Ausgangszugfahrt Trendlinien ermittelt. Diese werden integriert, sodass zwischen dem Beginn und dem Ende der jeweiligen Phase die Flächen unterhalb der Linien berechnet werden können. Durch Subtraktion dieser Flächen von der Fläche unterhalb der Trendlinie der konstanten Fahrt (entspricht einer Geraden, siehe Abbildung 12-1) ergibt sich die dB(A)-Reduktion.

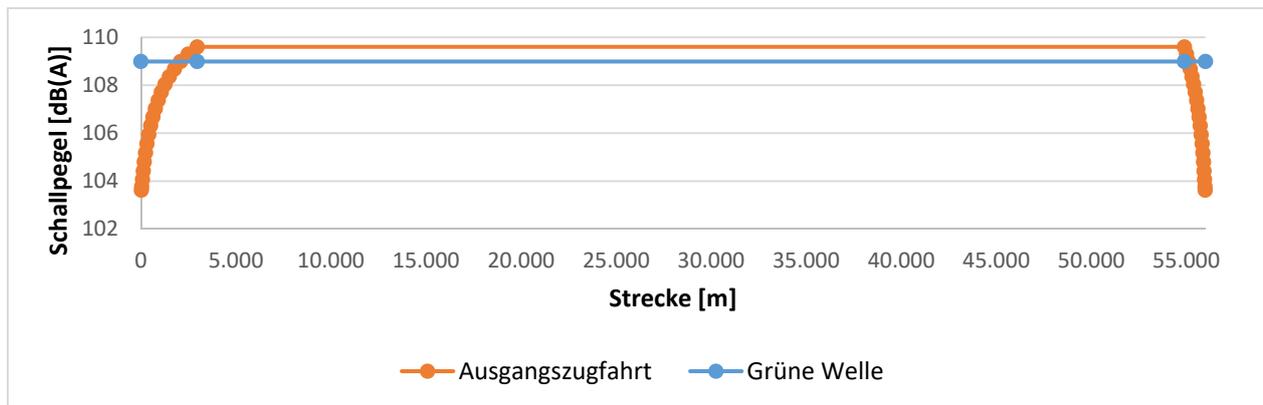


Abbildung 12-1: Geschw.-profil: Gegenüberstellung Ausgangszugfahrt und konstante Fahrt (eigene Darstellung)

In Tabelle 12-9 ist die Reduktion für die Zugfahrt auf der betrachteten Strecke dargestellt. Diese wird auf einen Kilometer umgerechnet und für die Berechnung des monetären Nutzens (siehe Formel 9-65) verwendet.

Tabelle 12-9: Geschw.-profil: Modellzüge und Schallpegelminderung

Güterzug	Zugkraft [%]	v_{\max} [km/h]	Bremskraft [%]	ΔL_{Nutzen} [dB(A)•km m]	L_{Zug} [km]	$\Delta L_{\text{Nutzen}} / L_{\text{Zug}}$ [dB(A)]
Ausgangszugfahrt	100	100	100	-	-	-
Konstante Fahrt	100	90	-	-25,15	56	-0,50

Da im Rahmen der Schall 03 die Berechnung des Schallpegels nur für einen bestimmten Punkt vorgenommen werden kann und die Schallreduktionen der einzelnen Phasen der Szenarien bereits berechnet wurden, werden hier keine weiteren Berechnungsergebnisse dargestellt.

In Tabelle 12-10 sind die jeweiligen Abstände von der Gleisachse, für die der Grenzwert von 64 dB(A) nach Schall 03 eingehalten ist, dargestellt.

Tabelle 12-10: Geschw.-profil: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme

Güterzug	Abstand ohne Maßnahme [m]	Abstand mit Maßnahme [m]	Delta Abstand [m]
Abstände [m]	31	29	-2

Monetäre Bewertung für Modellzug

In Tabelle 12-11 sind die Ergebnisse der monetären Bewertungskriterien (Kosten, betriebliche Wirkung und Nutzen) und das Nutzen-Kosten-Verhältnis für beide Richtungen dargestellt.

Tabelle 12-11: Geschw.-profil: Kriterien und monetäre Bewertung

Bewertungskriterium	Geschwindigkeitsprofil
Kosten [€/d]	-1.286,90
betriebliche Wirkung [€/d]	-81.000,90
Nutzen [€/d]	87,70
N-K-Verhältnis [-]	0,001

12.6 Ergebnisse

Für die untersuchten Maßnahmenarten ergeben sich folgende Nutzen-Kosten-Verhältnisse:

- Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen: 4,0
- Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung: 0,0003
- Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren): 0,001

Für die Maßnahmenart „Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen“ wurde ein ähnliches Verhältnis ermittelt, wie im Rahmen der Beispielstrecke. Die anderen beiden Maßnahmenarten weisen jeweils ein etwas schlechteres Verhältnis gegenüber der Beispielstrecke auf.

Bei den Maßnahmenarten „Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung“ und „Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)“ wurden für den monetären Nutzen jeweils sehr geringe Werte ermittelt. Dadurch ergibt sich, aufgrund der berechneten Kosten und des monetären Wertes der betrieblichen Wirkung, ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von kleiner eins. In zukünftigen Arbeiten sollte daher sowohl die Berechnung des monetären Nutzens, als auch der Kosten und der betrieblichen Wirkung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Da die Maßnahmenart des Wagenzuges ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von größer eins aufweist, ist damit ein Einsatz in der Praxis gerechtfertigt. Die anderen beiden Maßnahmenarten weisen ein Verhältnis von kleiner eins auf. Dies schließt eine Anwendung in der Praxis aus.

12.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die beispielhafte Untersuchung des Einsatzes von ausgewählten Maßnahmenarten anhand einer realen Strecke mit realen Betriebsdaten durchgeführt. Anhand derer konnte eine Einschätzung hinsichtlich der wirtschaftlichen Realisierbarkeit der Maßnahmenarten getroffen werden. Es kann festgestellt werden, dass nur eine Maßnahmenart ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von größer eins aufweist. Dies leitet sich aus gewählten Einflussgrößen, den verwendeten Formeln und den Daten der realen Strecke ab. Sollten sich diesbezüglich Änderungen ergeben, wird sich auch das Nutzen-Kosten-Verhältnis ändern. Dies könnte zur Folge haben, dass weitere Maßnahmen wirtschaftlich eingesetzt werden können oder der wirtschaftliche Einsatz von Maßnahmen nicht mehr möglich ist. Es ist also im Einzelfall zu prüfen, ob die wirtschaftliche Anwendung einer Maßnahme möglich ist.

13 Zusammenfassung und Ausblick

13.1 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit erhält ein Anwender eine Unterstützung zum möglichen Einsatz von betrieblichen Maßnahmenarten und deren Maßnahmen. Mit den dargestellten Formeln und den monetären Bewertungskriterien kann ein Nutzen-Kosten-Verhältnis berechnet werden und so über die Anwendung einer Maßnahme entschieden werden. Des Weiteren erhält der Anwender Informationen zu den damit möglichen Schallreduktionen.

Zum Erreichen der Schallreduktion wurden zunächst die vorhandenen Gruppen von Maßnahmenarten am Fahrweg und am Fahrzeug abgegrenzt. Somit konnten in einem nächsten Schritt die betrieblichen Maßnahmenarten ermittelt und entwickelt werden. Das Ergebnis ist ein Übersichtsbild mit 32 generischen Maßnahmenarten und einer Unterteilung in Ober- und Unterthemen, welche bisher in keiner Arbeit untersucht wurden. Um die große Anzahl an gefundenen Maßnahmenarten auf die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten zu reduzieren, wurde ein Schema zur Grobbewertung entwickelt und eine Bewertung durchgeführt. Die so identifizierten Maßnahmenarten und deren zugehörige Maßnahmen wurden anhand von Bewertungskriterien monetär beurteilt, sodass eine Aussage bezüglich einer möglichen Anwendung getroffen werden konnte. Die monetäre Bewertung ist so aufgebaut, dass eine Anwendung auf weitere Maßnahmenarten grundsätzlich möglich ist. Eine Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Verkehrsträger kann ebenfalls in Betracht gezogen werden. Den Abschluss der Arbeit bildet die Untersuchung von ausgewählten Maßnahmenarten mit realen Strecken- und Zugdaten.

Bezüglich der Berechnung der Schallemissionen bei sich ändernden Geschwindigkeiten (Beschleunigen, Auslaufen, Bremsen) wurde ein Verfahren präsentiert, mit dem eine Schallreduktion aufgrund der Anwendung einer Maßnahme berechnet werden kann.

Das Ziel der Arbeit, betriebliche Maßnahmenarten zur Schallreduktion zu untersuchen, wurde erfüllt. Des Weiteren erfüllen die Maßnahmenarten alle gestellten Anforderungen:

- umfassend: Der Einsatz ist sowohl von EIU als auch von EVU möglich.
- diskriminierungsfrei: Durch den Einsatz werden keine Unternehmen diskriminiert.
- unabhängig von Zeit, Ort, etc.: Diesbezügliche Einschränkungen entstehen erst durch die Einbeziehung dieser Dimensionen.
- Vergleichbarkeit der Bewertung: Die Bewertungskriterien wurden monetarisiert, sodass eine Vergleichbarkeit von zwei oder mehr Maßnahmen möglich ist.
- Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit: Die Beschreibung der Maßnahmenarten, die dargestellten Formeln und die monetäre Bewertung sind in der Form dargestellt, dass eine Übertragung auf andere Unternehmensgruppen und Einsatzgebiete möglich ist.
- realistisch: Die Nähe zur Realität wurde mit der beispielhaften Untersuchung anhand einer realen Strecke sichergestellt. Somit können die Maßnahmenarten durch die DB Netz AG eingesetzt werden. Eine grundsätzliche Praxistauglichkeit konnte gezeigt werden.

13.2 Ausblick

Trotz der umfangreichen Arbeiten zu den betrieblichen Maßnahmenarten zur Schallreduktion besteht weiterer Forschungsbedarf. Dies bezieht sich vor allem auf die Sensitivität des Nutzen-Kosten-Verhältnisses, welches u. a. von den Einflussgrößen abhängig ist. Im Rahmen der Arbeit wurden diesbezüglich keine Untersuchungen durchgeführt. So kann es durchaus möglich sein, dass durch eine Änderung einer Einflussgröße das Nutzen-Kosten-Verhältnis größer eins wird und damit die Wirtschaftlichkeit gewährleistet ist. Ebenso kann das genaue Gegenteil eintreten. Wird das Verhältnis kleiner eins, ist die Anwendung einer Maßnahme nicht mehr wirtschaftlich.

Zu den monetären Bewertungen der Bewertungskriterien sollten ebenfalls noch weitere Untersuchungen erfolgen. Im Rahmen der Arbeit wurden erste Ansätze getroffen, die bezüglich der Praxistauglichkeit überprüft werden sollten. Ergeben sich daraus Änderungen gegenüber den dargelegten Ansätzen, wird sich auch das Nutzen-Kosten-Verhältnis ändern. Hier sind besonders die dargestellten Kostensätze zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Die Ergebnisse der ermittelten Nutzen-Kosten-Verhältnisse sind im Hinblick auf die o. g. Punkte zu sehen. Die Arbeit gibt hier einen möglichen Ansatz zur Bewertung, welcher mit entsprechenden Anpassungen übertragen werden kann. Zum Beispiel sind die dargestellten Formeln allgemeingültig, die verwendeten Kostensätze aber nicht. Dies ist bei einer Anwendung zu berücksichtigen.

Des Weiteren wurde die Mehrheit der ermittelten und entwickelten Maßnahmenarten aufgrund des Ergebnisses der Grobbewertung nicht weiter untersucht. In folgenden Arbeiten sollten auch diese einer monetären Bewertung unterzogen werden, sodass eine Aussage hinsichtlich eines wirtschaftlichen Einsatzes erfolgen kann. Darüber hinaus könnten Maßnahmenarten existieren, die im Rahmen der Ermittlung und Entwicklung nicht berücksichtigt wurden. Dies ist besonders vor dem Hintergrund zu sehen, dass betriebliche Maßnahmenarten bisher nicht zum Einsatz kamen und daher sehr wenige Erfahrungswerte vorliegen.

Im Hinblick auf das Berechnungsverfahren nach Schall 03 lässt sich feststellen, dass die Berechnung des Schallpegels nicht für alle Maßnahmenarten erfolgen konnte. Dies liegt darin begründet, dass die Phasen mit Geschwindigkeitsänderung (Beschleunigen, Auslaufen und Bremsen) nicht abgebildet werden. Im Rahmen der Arbeit wurde dazu eine Alternative dargestellt und die Schallpegel entsprechend berechnet. Aufgrund der Abhängigkeit der monetären Bewertung vom Nutzen sollte die Alternative überprüft und die Berechnung gegebenenfalls angepasst werden. Da die genannten Phasen nicht abgebildet sind, kann keine Variation innerhalb der Phasen erfolgen. Dies betrifft z. B. die Beschleunigung mit verringerter Anfahrzugkraft oder das Bremsen mit verringerter Bremskraft. Es wird daher empfohlen, das Berechnungsverfahren der aktuellen Schall 03 zu überarbeiten, damit eine umfassende Berechnung der Schallpegel einer Zugfahrt möglich wird.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH (2017a): EEG-Umlage 2017. Hg. v. 50Hertz Transmission GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/EEG/EEG-Umlage/EEG-Umlage-2017>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- 50Hertz Transmission GmbH (2017b): KWKG-Umlage 2017. Hg. v. 50Hertz Transmission GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/KWKG/KWKG-Umlage/KWKG-Umlage-2017>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- 50Hertz Transmission GmbH (2017c): Offshore-Haftungsumlage für 2017 nach § 17f EnWG. Hg. v. 50Hertz Transmission GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/EnWG/Umlage-17f-EnWG/Umlage-17f-EnWG-2017>, zuletzt aktualisiert am 20.07.2017.
- 50Hertz Transmission GmbH (2017d): Umlage für abschaltbare Lasten nach § 18 AbLaV. Hg. v. 50Hertz Transmission GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/EnWG/Umlage-18-AbLaV/Umlage-18-AbLaV-2017>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- 50Hertz Transmission GmbH (2017e): Umlage nach § 19 Abs. 2 StromNEV für 2017. Hg. v. 50Hertz Transmission GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/EnWG/Umlage-nach-19-StromNEV/Umlage-nach-19-StromNEV/Umlage-nach-19-StromNEV-2017>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- Abele, Eberhard; Boltze, Manfred; Pfohl, Hans-Christian (Hg.) (2017): *Dynamic and Seamless Integration of Production, Logistics and Traffic. Fundamentals of Interdisciplinary Decision Support*. Cham, s.l.: Springer International Publishing.
- Allianz pro Schiene e. V. (2016): *Sieben Schritte auf dem Weg zu einem leiseren Schienengüterverkehr*. Hg. v. Allianz pro Schiene e. V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2016/03/7-Schritte-auf-dem-Weg-zu-einem-leiseren-Schieneng%C3%BCterverkehr.pdf>, zuletzt geprüft am 21.04.2017.
- Allianz pro Schiene e. V. (2017a): *Leitbild und Ziele*. Hg. v. Allianz pro Schiene e. V. Online verfügbar unter <https://www.allianz-pro-schiene.de/ueber-uns/der-verband/leitbild-und-ziele/>, zuletzt geprüft am 21.04.2017.
- Allianz pro Schiene e. V. (2017b): *Jahresbericht 2016*. Hg. v. Allianz pro Schiene e. V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2015/10/Jahresbericht-2016-Allianz-pro-Schiene.pdf>, zuletzt geprüft am 21.04.2017.
- Ashford, Norman; Beasley, John; Coutu, Pierre (2013): *Airport Operations, Third Edition*. 3rd edition. New York, N.Y: McGraw-Hill Education.
- Asmussen, Bernd; Koch, Bernhard; Schwarz, Henning (2016): *Lärminderung - Herausforderung für den Schienenverkehr*. In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau* (September), S. 60–65.
- Asmussen, Bernd; Lange, Susanne; Rothhämel, Jörg (2017): *Die Bedeutung des Schienenzustands für die Entstehung und Prognose von Schienenlärm*. In: *Lärmbekämpfung* 12 (5), S. 158–163.

ASTRA (2011): Operative Sicherheit Betrieb. Vorgaben für die Tunnel und die offene Strecke. Version 1.02. Hg. v. Bundesamt für Strassen. Bern. Online verfügbar unter https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwiIzfv7-s3ZAhVHzaQKHdzcQYQFgg1MAI&url=https%3A%2F%2Fwww.astra.admin.ch%2Fdam%2Fastra%2Fde%2Fdokumente%2Fstandards_fuer_nationalstrassen%2Fastra_16050_operativesicherheitbetrieb2011v102.pdf.download.pdf%2Fastra_16050_operativesicherheitbetrieb2011v102.pdf&usg=AOvVaw095vIrYvmXuB4w7n-zub1y, zuletzt geprüft am 02.03.2018.

BAFU (2018): Lärm: Publikationen. Hg. v. Bundesamt für Umwelt. Online verfügbar unter <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/publikationen-studien.html>, zuletzt geprüft am 26.02.2018.

BASt (2012): Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. Online verfügbar unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor.php?source_opus=578&la=de, zuletzt geprüft am 31.03.2017.

BAV (2016): Eisenbahnausbauprogramme. Bahninfrastrukturfonds (BIF). Hg. v. Bundesamt für Verkehr. Bern. Online verfügbar unter https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/aktuell-startseite/berichte/standbericht_2016_eisenbahn_ausbauprogramme.pdf.download.pdf/Standbericht%202016%20-%20Eisenbahn-Ausbauprogramme.pdf, zuletzt geprüft am 26.02.2018.

BDB (2016): Lärm und Umwelt. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Binnenschiffahrt e.V. (BDB). Online verfügbar unter <https://www.binnenschiff.de/content/wasserstrasse/umwelt/>, zuletzt geprüft am 03.02.2018.

BDL (2016): Fluglärm Report 2015. Hg. v. BDL – Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.fluglaerm-portal.de/download/567/bdl-fluglaermreport2015-april-2016.pdf>, zuletzt geprüft am 10.10.2017.

BMLFUW (2007): Handbuch Umgebungslärm. Minderung und Ruhevorsorge. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. Wien. Online verfügbar unter http://www.laerminfo.at/service/laermpublikationen/hb_umgebungslaerm.html, zuletzt geprüft am 26.02.2018.

BMUB (2006): Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. 34. BImSchV, vom 06.03.2006. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_34/gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2017.

BMUB (2014): Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. 16. BImSchV, vom 18.12.2014. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_16/gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

BMVBS (2006): Standardisierte Bewertung von Verkehrsweeinvestitionen des ÖPNV und Folgekostenrechnung. Version 2006. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

BMVBS (2009): Nationales Verkehrslärmschutzpaket II. "Lärm vermeiden - vor Lärm schützen". Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Luft/nationales-verkehrslaerm-schutzpaket-ii.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 30.03.2017.

BMVBS (2012): Straße im 21. Jahrhundert. Innovativer Straßenbau in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/strasse-im-21-jahrhundert.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 30.03.2017.

BMVI (2015a): Erläuterungen zur Anlage 2 der Sechzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV), Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03). Teil 1: Erläuterungsbericht. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Schiene/verkehrslaermschutzvo-schall-03-erlaeterungen.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

BMVI (2015b): Erläuterungen zur Anlage 2 der Sechzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV), Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03). Teil 2: Testaufgaben. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Schiene/verkehrslaermschutzvo-schall-03-testaufgaben.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 07.08.2017.

BMVI (2016a): Lärmschutz im Schienenverkehr. Alles über Schallpegel, innovative Technik und Lärmschutz an der Quelle. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LA/laermschutz-im-schienenverkehr-broschuere.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

BMVI (2016b): Verkehr in Zahlen 2016/17. 44., aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe. Hamburg: DVV Media Group.

Brettmann, Eberhard (1965): Aufwand und Kosten für Betriebserschwerisse im Zugbetrieb. In: *Der Eisenbahningenieur* 16 (9), S. 220–224.

BSL (2013): Marktreport SPNV. Ein Lagebericht zum Wettbewerb im Schienenpersonennahverkehr. Hg. v. BSL Transportation Consultants GmbH & Co. KG. Hamburg. Online verfügbar unter http://bagspnv.de/presse/details/marktreport-spnv-2013-der-wettbewerb-im-spnv-ist-wieder-im-aufwind-braucht-aber-stabilere-rahmenbedingungen?file=files/bagspnv/presse/2013/06/2013-06-28_Marktreport_SPNV_2013_final.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

Bundesfinanzministerium (1998): AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)". Hg. v. Bundesministerium der Finanzen. Online verfügbar unter

http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/1998-01-26-afa-99.pdf;jsessionid=A2A754760B2E50154F1F08162BB23E05?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 08.05.2017.

Bundesnetzagentur (2016): Jahresbericht 2015. Wettbewerb fördern. Netze ausbauen. Verbraucherinnen und Verbraucher schützen. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2016/Jahresbericht2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 05.04.2017.

Bundesregierung (2013): Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 18. Legislaturperiode. Hg. v. Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 08.05.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2005): Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung. EIBV, vom 01.08.2005. Online verfügbar unter <http://www.buzer.de/gesetz/3102/index.htm>, zuletzt geprüft am 05.04.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2016a): Allgemeines Eisenbahngesetz. AEG, vom 02.09.2016. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/aeg_1994/gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2016b): Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO). EBO, vom 10.10.2016. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ebo/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2016c): Eisenbahnregulierungsgesetz. ERegG, vom 29.08.2016. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eregg/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 05.04.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2016d): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). BImSchG, vom 30.11.2016. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschg/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2016e): Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs. RegG, vom 23.12.2016. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/regg/>, zuletzt geprüft am 28.09.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2016f): Stromsteuergesetz. StromStG, vom 23.12.2016. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/StromStG.pdf>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2017a): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz). EEG, vom 22.12.2016. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

Bundesrepublik Deutschland (2017b): Gesetz zum Verbot des Betriebs lauter Güterwagen (Schienenlärmschutzgesetz - SchlärmschG). SchlärmschG, vom 20.07.2017. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/schl_rmschg/Schl%C3%A4rmschG.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2018.

BVU (2012): Streckenmodell MOSES. Version 4.1: Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH.

Claus, Volker; Schwill, Andreas (Hg.) (2001): Duden Informatik. Ein Fachlexikon für Studium und Praxis. Bibliographisches Institut Mannheim. 3. Aufl. Mannheim: Dudenverlag.

DB Energie GmbH (2013): Der Preis für Dieselkraftstofflieferung an den Schientankstellen der DB Energie. Hg. v. DB Energie GmbH. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter http://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/13814752/6A_VGVWbu_QE-gCFle8pL6cxXE8/4448682/data/Der_Preis_fuer_Dieselmkraftstofflieferung.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

DB Energie GmbH (2017a): Preisblatt für die Nutzung des 16,7-Hz-Bahnstromnetzes (Bahnstromnetz) gültig ab 01.01.2017. Hg. v. DB Energie GmbH. Online verfügbar unter http://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/12924840/YdrSQ1ZUDOLHGjTGye5yu9jN28s/12965132/data/Preisblatt_Netznutzung_2017.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

DB Energie GmbH (2017b): Über uns. Hg. v. Deutsche Bahn AG. Online verfügbar unter <http://www.dbenergie.de/dbenergie-de/db-energie-unternehmen/unternehmen.html>, zuletzt geprüft am 16.02.2018.

DB Fernverkehr AG (2016): Geschäftsbericht 2015. Hg. v. DB Fernverkehr AG. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://www1.deutschebahn.com/file/ecm2-db-de/1488952/W-p3JFF8BybY2GINkFflgJPH9G8/11201330/data/2015_gb_dbfv.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2017.

DB Netz AG (2008): Richtlinie 405: Fahrwegkapazität. Hg. v. DB Netz AG.

DB Netz AG (2009a): Richtlinie 402: Trassenmanagement. Unter Mitarbeit von Volker Butzbach. Hg. v. DB Netz AG. Frankfurt am Main.

DB Netz AG (2009b): Richtlinie 413: Infrastruktur gestalten. Unter Mitarbeit von Gerhard Brückmann. Hg. v. DB Netz AG. Frankfurt am Main.

DB Netz AG (2012): Innovative Maßnahmen zum Lärm- und Erschütterungsschutz am Fahrweg. Schlussbericht 15.06.2012. Hg. v. DB Netz AG. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter http://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/2394208/DiXusuErrO015KVuu03mvnSSHpo/2734904/data/schlussbericht__konjunkturprogramm__2011.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

DB Netz AG (2015a): Geschäftsbericht 2015. Mehr Qualität, mehr Kunden, mehr Erfolg. Hg. v. DB Netz AG. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter http://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/9150310/UK1_3PO9iDFZx-IEt0dRG9zb0no/2735096/data/geschaeftsbericht_2015_dbnetz.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

DB Netz AG (2015b): Anlagenpreissystem (APS). Liste der Entgelte für Serviceeinrichtungen der DB Netz AG 2017. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter http://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/13394336/yB0l2A04mgY379QEZPAOWHbw43g/13394366/data/serviceeinrichtungen_listen_entgelte_aps_2017.pdf, zuletzt geprüft am 10.08.2017.

DB Netz AG (2016): Das Trassenpreissystem 2017 der DB Netz AG. Hg. v. DB Netz AG. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/10316940/qfJOoUM-144A3I6tExnEyIeqoCs/13829120/data/tpsbrochuere2017.pdf>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

DB Netz AG (2017a): Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG 2017 (SNB 2017). Frankfurt am Main. Online verfügbar unter http://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/2397820/xWfSYx7quuhGFRP6xvI453kboJY/9801940/data/snb_2017.pdf, zuletzt aktualisiert am 21.03.2017.

DB Netz AG (2017b): Verkehrs- und Infrastrukturdaten der Strecke 3600. Hg. v. DB Netz AG.

DB Netz AG (2017c): Richtlinie 417: Koordination Fahrplan - Baubetrieb. Hg. v. DB Netz AG. Frankfurt am Main.

DB Netz AG (2018): Richtlinie 800: Netzinfrastruktur Technik entwerfen. Hg. v. DB Netz AG. Frankfurt am Main.

DB Regio AG (2016): Baustellenbündelmaßnahmen der DB Netz AG: Gleis- und Weichenerneuerungen zwischen Stg.-Vaihingen – Böblingen sowie im Bahnhof Böblingen. Bauzeit vom 13.07. – 10.09.2016. Hg. v. DB Regio AG. Online verfügbar unter https://www.deutschebahn.com/file/pr-stuttgart-de/8598246/sXfUqfcCTMaZ9vrDgejSsKIRkNE/11583654/data/Praesentation_Fahrplan_Stuttgart_Vaihingen_Boeblingen.pdf, zuletzt geprüft am 02.03.2018.

DB Regio AG (2017): Geschäftsbericht 2015. Mehr Qualität, „mehr Kunden, mehr Erfolg. Hg. v. DB Regio AG. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://www1.deutschebahn.com/file/ecm2-db-de/12205942/cdIKk1FaraUxgdQCn_5kDMaEbM0/11201332/data/2015_gb_dbregio.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2018.

DB Station&Service AG (2015): Wir bauen und betreiben Bahnhöfe! Hg. v. DB Station&Service AG. Berlin. Online verfügbar unter https://www.deutschebahn.com/file/de/11877768/V3YQkbOkHqnLWsLdmgZkankT778/5431896/data/140728_dbnetze_bahnhofsbetreiber.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2017.

DB Station&Service AG (2017): Stationspreisliste 2017. Hg. v. DB Station&Service AG. Berlin. Online verfügbar unter http://www.deutschebahn.com/file/de/11878072/Xqvb5YtFO2llvnPvQTbDVvGwus4/11820348/data/stationspreisliste_2017.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

DB Umweltzentrum (2014): Lärmschutz. Der leisen Bahn gehört die Zukunft. Hg. v. Deutsche Bahn AG. Berlin.

DEGES (2015): Projektmanagement bei ÖPP-Projekten im Bundesfernstraßenbereich. Hg. v. Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/2015/zukunftsreform-infrastruktur-vortrag-brandenburger.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 02.03.018.

Deutsche Bahn AG (2009): Schallschutz - eine Investition in die Zukunft der Bahn. Hg. v. Deutsche Bahn AG. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.deutschebahn.com/file/de/11900254/uCryNn8fCmgqd90FzjtCp11XLLM/2179626/data/schallschutzbrochure.pdf>, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

Deutsche Bahn AG (2015): Integrierter Bericht 2015. Mehr Qualität, mehr Kunden, mehr Erfolg. Hg. v. Deutsche Bahn AG. Berlin. Online verfügbar unter <http://ib2015.deutschebahn.com/ib2015-de/download-center.html>, zuletzt geprüft am 22.03.2017.

Deutsche Bahn AG (2016): Der leisen Bahn gehört die Zukunft. Hg. v. Deutsche Bahn AG. Berlin. Online verfügbar unter https://bauprojekte.deutschebahn.com/media/projects/3236/docs/EK_Effektkarte_Laermschutz_der_1_eisen_bahn_gehoert_zukunft_201604.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

Deutsche Bahn AG (2017a): Ortsfester Lärmschutz – aktive und passive Schallschutzmaßnahmen. Hg. v. DB Umwelt. Online verfügbar unter http://www1.deutschebahn.com/laerm/infrastruktur/ortsfester_laermschutz.html, zuletzt geprüft am 12.09.2017.

Deutsche Bahn AG (2017b): Rechtliche Grundlagen. Gesetze und Vorschriften. Hg. v. Deutsche Bahn AG. Online verfügbar unter http://www1.deutschebahn.com/laerm/grundlagen/rechtliche_grundlagen.html, zuletzt geprüft am 30.03.2017.

-
- Deutsche Bundesbahn (1961): Dienstvorschrift für die Berechnung der Kosten einer Zugfahrt (Zuko). Hg. v. Deutsche Bundesbahn.
- Deutsche Bundesbahn (1970): Vorschrift über Leistungen für Dritte. Hg. v. Deutsche Bundesbahn. Frankfurt am Main.
- Deutscher Bundestag (2017a): Bundestag verbietet den Einsatz lauter Güterwagen. Hg. v. Deutsche Bundestag. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2017/kw13-de-schienenlaermschutzgesetz/499920>, zuletzt geprüft am 03.10.2017.
- Deutscher Bundestag (2017b): Entwurf eines Gesetzes zum Verbot des Betriebs lauter Güterwagen (Schienenlärmschutzgesetz – SchlärmschG. Hg. v. Deutscher Bundestag. Online verfügbar unter <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/112/1811287.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2018.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Juli 2014a): Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen. DIN EN ISO 3095, zuletzt geprüft am 13.02.2017.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2003): Bahnanwendungen - Bremsen Bremssysteme des öffentlichen Nahverkehrs - Teil 1: Anforderungen an das Leistungsvermögen. DIN EN 13452-1.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Dezember 2009): Akustik - Begriffe. DIN 1320, zuletzt geprüft am 13.02.2017.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Juli 2014b): Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen. DIN EN 61672-1.
- Dickenbrok, Björn (2012): Wirtschaftliche Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen zur Anpassung der Streckenleistungsfähigkeit auf Grundlage einer integrierten Systembetrachtung.
- Dittrich, Michael (2007): The IMAGINE Source Model for Railway Noise Prediction. In: *Acta Acustica united with Acustica* (93), S. 185–200.
- DLR (2007): DLR-Projekt „Leiser Flugverkehr II“. Abschlussbericht. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Online verfügbar unter http://www.dlr.de/as/Portaldata/5/Resources/dokumente/abteilungen/abt_ts/Abschlussbericht_Wissenschaft.pdf, zuletzt geprüft am 10.10.2017.
- Donner, Ulrich; Dudenhöfer, Bernd (2009): Leiser Verkehr durch lärmarme Fahrbahnbeläge für kommunale Straßen. In: *VSVI Journal*, S. 55–59. Online verfügbar unter http://www.asphalta.de/prueflabor/downloads/VSVI_Inhalt_55-59.pdf, zuletzt geprüft am 03.02.2018.
- EBA (2016): Liste der nichtöffentlichen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und Halter von Fahrzeugen gemäß § 31 AEG in Deutschland. Hg. v. Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Online verfügbar unter https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Eisenbahnunternehmen/EVU/evu_noe_brd.html?nn=491064, zuletzt geprüft am 29.03.2017.
- EBA (2017a): EBA-Jahresbericht 2016/17. Hg. v. Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Bonn. Online verfügbar unter https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Jahresberichte/91_eba_jb_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 29.07.2017.

-
- EBA (2017b): Lärmkartierung. Hg. v. Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Online verfügbar unter https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2017/02_2017_Neue_Laermkarten_veoeffentlicht.html, zuletzt geprüft am 29.07.2017.
- EBA (2017c): Liste der Betreiber von Eisenbahnstrecken. Hg. v. Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Online verfügbar unter https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Eisenbahnunternehmen/EIU/eiu_oeff.html?nn=488162, zuletzt geprüft am 29.03.2017.
- EBA (2017d): Liste der öffentlichen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) in Deutschland. Hg. v. Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Online verfügbar unter https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Eisenbahnunternehmen/EVU/evu_brd.html?nn=491064, zuletzt geprüft am 29.03.2017.
- Elmasri, Ramez A.; Navathe, Shamkant B. (2009): Grundlagen von Datenbanksystemen. 3. Aufl. München [u.a.]: Pearson Studium.
- Europäische Union (2002): EU-Umgebungslärmrichtlinie, vom 25.06.2002. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=DE>, zuletzt geprüft am 30.03.2017.
- Europäische Union (2007): Verordnung über die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems, vom 05.07.2007. Online verfügbar unter http://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/GesetzeundRegelwerk/Bundesrecht/11_teiv.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 30.03.2017.
- Europäische Union (2014): Verordnung über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge - Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU. TSI Lärm, vom 26.11.2014. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1304&from=DE>, zuletzt geprüft am 30.03.2017.
- Europäische Union (2015): Festlegung der Modalitäten für die Anlastung der Kosten von Lärmauswirkungen, vom 13.03.2015. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0429&from=DE>, zuletzt geprüft am 28.04.2017.
- Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik (2015): Tool zur Berechnung der Fahrzeit. Version 1.1.
- Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik (2016a): Tool zur Berechnung des Schallpegels. Version 1.5.
- Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik (2016b): Verkehr II - Teil Bahnsysteme und Bahntechnik. Materialien zur Vorlesung. TU Darmstadt. Darmstadt.
- Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (2016): Materialien zu den Vorlesungen Verkehr II. Verkehrsplanung und Verkehrstechnik. TU Darmstadt. Darmstadt.
- Ferstl, Otto K.; Sinz, Elmar J. (2001): Grundlagen der Wirtschaftsinformatik. 4. Aufl. München [u.a.]: Oldenbourg Verlag.
- Fraport: Betriebszeiten. Hg. v. Fraport AG. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://www.fraport.de/content/fraport/de/nachbarschaft-region/flugverfahren/betriebszeiten.html>, zuletzt geprüft am 26.02.2018.

-
- Frißen, Christine (2012): Die Berücksichtigung von Betriebserschwerungskosten bei der Planung von Baumaßnahmen. In: Michael Ronellenfitsch (Hg.): Aktuelle Probleme des Eisenbahnrechts XVII. Vorträge im Rahmen der Tagung am 7. und 8. September 2011 in Tübingen. Hamburg, 2012.
- GDL (2015): Die Stundenlöhne der Lokomotivführer von 1994 bis 2018. Hg. v. GDL - Gewerkschaft Deutscher Lokomotivführer. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://gdl.de/Service/BroschuereTarif-1445503102>, zuletzt geprüft am 25.08.2017.
- Griese, Sören (22.08.2017): Weiterentwicklung der Zuglaufregelung. Interview mit Andreas Oetting. Darmstadt.
- Gutachterkonsortium (2014): Revision der Regionalisierungsmittel. Mittelbedarf der Bundesländer für den Revisionszeitraum 2015-2030. Hg. v. KCW GmbH, ETC Transport Consultants GmbH und Rödl & Partner. Online verfügbar unter http://www.verkehrsministerkonferenz.de/VMK/DE/termine/sitzungen/14-10-01-02-vmk/14-10-01-02-gutachten-5-1.pdf?__blob=publicationFile&, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- Heister, Gert (2005): Eisenbahnbetriebstechnologie. 1. Aufl. Heidelberg: Eisenbahn-Fachverl. (DB-Fachbuch).
- Hempe, Thomas (2006): Ein LCC-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen. Dissertation. Universität Hannover, Hannover. Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb.
- Hessen Mobil (2014): Verkehrsmanagement Region Frankfurt RheinMain. Leitfaden zur Anwendung. Hg. v. Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement. Wiesbaden.
- ICAO (2004): The Balanced Approach to Aircraft Noise Management Aircraft Noise Management. International Civil Aviation Organization (ICAO). Online verfügbar unter https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Publications/Guidance_BalancedApproach_Noise.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Jackisch, Ingo (Hg.) (2006): Handbuch für den Eisenbahnbetriebsleiter. Leipzig: Aus- und Weiterbildungszentrum Verkehrsgewerbe Leipzig GmbH.
- Janicki, Jürgen (2011): Systemwissen Eisenbahn. 1. Aufl. Berlin: BFV Bahn-Fachverlag.
- Jansen, Erwin; Dittrich, Michael; Sikma, Erik (2008): Brake noise measurements on mixed freight trains with composite brake blocks. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (June), S. 2655–2660. Online verfügbar unter <http://webitem.com/acoustics2008/acoustics2008/cd1/data/articles/001276.pdf>, zuletzt geprüft am 01.09.2018.
- Jochim, Haldor E. (1999): Verkehrswirtschaftliche Ermittlung von Qualitätsmaßstäben im Eisenbahnbetrieb. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Kefer, Volker; Oetting, Andreas (2008): Weiterentwicklung von Technologien für Planung und Betrieb des Bahnverkehrs. In: *EI-Der Eisenbahningenieur* (07), zuletzt geprüft am 30.05.2017.
- Kloepfer, Michael; Griefahn, Barbara; Kaniowski, Andrzej M.; Klepper, Gernot; Lingner, Stephan; Steinebach, Gerhard et al. (2006): Leben mit Lärm? Risikobeurteilung und Regulation des Umgebungslärms im Verkehrsbereich. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung, 28).

Krell, Karl (1990): Handbuch für Lärmschutz an Straßen und Schienenwegen. 2. Aufl. Darmstadt: Elsner.

Lenz, Udo (2016): Schall und Erschütterungen bei Bahnen nach BOStrab. Messung, Bewertung und Minderungsmaßnahmen. Berlin: Erich Schmidt Verlag (Schriftenreihe für Verkehr und Technik, 98).

LfU (2017): Lärm - Hören, messen und bewerten. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg. Online verfügbar unter http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_34_laerm_messen_bewerten.pdf, zuletzt aktualisiert am Februar 2017.

Lienau, Cay (2006): Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover. Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie.

Lübke, Dietmar (2008): Das System Bahn. Handbuch. 1. Aufl. Hamburg: DVV Media Group (Eurailpress).

Maute, Dieter (2006): Technische Akustik und Lärmschutz. München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Mensen, Heinrich (2007): Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen. Mit 431 zum Teil farbigen Abbildungen und 102 Tabellen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch).

Müller, Gerhard; Möser, Michael (Hg.) (2004): Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer-Verlag. Dritte, erweiterte und überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Nebelung, Hermann (1957): Mehraufwand für Betriebserschwerisse im Zugförderungsdienst. In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau* 6 (1), S. 14–26.

Oetting, Andreas (2008): Zuglaufregelung - Optimierte Steuerung der Züge im Betrieb. In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau* (10), zuletzt geprüft am 30.05.2017.

Oetting, Andreas; Welter, Kristin (2014): Exakte Modellierung von Fahrempfehlungen zur Geschwindigkeitsoptimierung eines Zuges auf Basis der aktuellen Betriebssituation. In: *24. Verkehrswissenschaftliche Tage 2014*.

Oetting, Antje (2005): Physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Bauingenieurwesen. Online verfügbar unter <http://publications.rwth-aachen.de/record/61482>, zuletzt geprüft am 30.06.2017.

Pachl, Jörn (2016): Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-12986-6>.

Potthoff, Gerhart (1968): Verkehrsströmungslehre. 2., überarb. Aufl. Berlin: VEB Verl. f. Verkehrswesen Transpress.

Rittner, Michael (2012): Evaluation of supply quality in passenger transport as a basis for the assessment of railway infrastructure measures. A2 - EFFICIENCY AND SAFETY OF RAIL-BOUND SYSTEMS. Universität Stuttgart. Prof. Dr.-Ing. Corinna Salander. Stuttgart, 27.09.2012. Online verfügbar unter http://www.uni-stuttgart.de/fovus/NfM/presentations/NfM2012_Rittner_FreeFloat.pdf, zuletzt geprüft am 28.08.2017.

-
- Rothenstein, Dirk (2010): Zur Bedeutung der Kundenzufriedenheit für im Schienenpersonennahverkehr tätige Unternehmen. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Essen. Abteilung Bauwissenschaften. Online verfügbar unter http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-24416/Dissertation_Rothenstein_Endfassung.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- Sauer, Wolfgang (1984): Die Produktivität von Eisenbahnstrecken. Untersuchung über die Abhängigkeit der Produktionskosten einer Eisenbahnstrecke von betrieblichen Parametern wie Streckenbelastung, Mischungsverhältnis und Mindestzugfolgezeiten. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Schilling, Rosemarie (2000): Modell für eine kostenoptimierte Instandhaltung in großen Netzen des spurgeführten Verkehrs. Darmstadt: Hestra-Verlag.
- Schulte-Zurhausen, Manfred (2010): Organisation. 5., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Vahlen (Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Schurig, Roland; Wagner, Helmut (2001): Kommentar zur Straßenverkehrs-Ordnung. 10. Aufl., Stand Januar 2001. Bonn: Kirschbaum.
- Schwanhäußer, Wulf (1974): Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Bauingenieurwesen. Online verfügbar unter http://www.s-g-ingenieure.de/Dissertation_Schwanhaeusser_2te_Auflage_Text.pdf, zuletzt geprüft am 02.08.2017.
- Schweers, Hans; Wall, Henning; Würdig, Thomas (2017): Eisenbahnatlas Deutschland 2017. 10. Auflage: Schweers + Wall.
- Siegmann, Jürgen; Stuhr, Helge (2012): Hat der Einzelwagenverkehr (EV) in Europa noch eine Chance? In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau* (03), S. 10–18, zuletzt geprüft am 31.05.2017.
- SNCF (2015): Preventing and reducing railway noise to protect quality of life. Hg. v. Société nationale des chemins de fer français. Online verfügbar unter <https://www.sncf-reseau.fr/en/about/sustainable-development/environment/noise-reduction>, zuletzt aktualisiert am 2015, zuletzt geprüft am 26.02.2018.
- Springer Verlag: Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: kalkulatorische Zinsen. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/3160/kalkulatorische-zinsen-v6.html>, zuletzt geprüft am 08.05.2017.
- Springer Verlag: Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Kosten. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54284/kosten-v7.html>, zuletzt geprüft am 29.06.2017.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2017): Gebiet und Bevölkerung. Hg. v. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb01_jahrtab1.asp, zuletzt aktualisiert am 26.01.2017, zuletzt geprüft am 10.08.2017.
- Statistisches Bundesamt (2009): Verdienste und Arbeitskosten. Verdienststrukturerhebung 2006 - Verdienste nach Berufen -. Hg. v. Statistisches Bundesamt. 19.01.2009. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VerdiensteArbeitskosten/VerdiensteBerufe/VerdienstenachBerufe5621108069004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 21.07.2017.

Statistisches Bundesamt (2016): Bundesländer mit Hauptstädten nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte am 31.12.2016. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Aktuell/02Bundeslaender.html>, zuletzt geprüft am 03.06.2018.

Statistisches Bundesamt (2017a): Arbeitskosten je Vollzeitbeschäftigten: Deutschland, Jahre, Unternehmensgrößenklassen, Wirtschaftszweige, Arbeitskostenarten. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=FFC0DD8E479E92111F17E0A979938464.tomcat_GO_1_3?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1499860854681&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=62411-0001&auswahltext=%23SWZ08D3-WZ08-49%23SUGKL01-ARBNA1000U&werteabruf=starten&nummer=6&variable=3&name=WZ08D3, zuletzt geprüft am 12.07.2017.

Statistisches Bundesamt (2017b): Preise. Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise). Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Erzeugerpreise/ErzeugerpreisePDF/Erzeugerpreise2170200171054.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 11.07.2017.

UBA (2004): Lärmwirkungen von Straßenverkehrsgerauschen. Auswirkungen eines lärmarmen Fahrbahnbelages. Unter Mitarbeit von Heidemarie Wende, Jens Ortscheid und Matthias Hintzsche. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3047.pdf>.

UBA (2010a): Schienennetz 2025 / 2030. Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4005.pdf>, zuletzt geprüft am 24.05.2017.

UBA (2010b): Lärmwirkung. Dosis-Wirkungsrelationen. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3917_0.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2017.

UBA (2014): Forschungsprogramm des Umweltbundesamtes 2015-2017. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba-forschungsprogramm_2015-2017.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2017.

UBA (2017a): Strategien zur effektiven Minderung des Schienengüterverkehrslärms. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-08_texte_19-2017_minderung-schienengueterverkehrs-laerm.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

UBA (2017b): Immissionsschutzrecht. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/umweltrecht/immissionsschutzrecht#textpart-1>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2017, zuletzt geprüft am 30.03.2017.

UIC (1992): Faktoren, die die Unterhaltungskosten des Gleises beeinflussen und ihre relative Bedeutung. 3. Ausgabe. Hg. v. Union Internationale des Chemins de Fer. Paris.

UIC (2009): Klasseneinteilung der Streckengleise vom Gesichtspunkt der Gleiserhaltung. 4. Ausgabe. Hg. v. Union Internationale des Chemins de Fer. Paris.

Umwelthaus GmbH (2017): DROps – Betriebskonzept für die Randstunden. Hg. v. Gemeinnützige Umwelthaus GmbH. Kelsterbach. Online verfügbar unter <https://www.umwelthaus.org/fluglaerm/anwendungen-service/drops-betriebskonzept-fuer-die-randstunden/>, zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 26.02.2018.

VCD: Für eine umwelt- und sozialverträgliche, sichere und gesunde Mobilität. Ziele. Hg. v. Verkehrsclub Deutschland e. V. Online verfügbar unter <https://www.vcd.org/der-vcd/ziele/#c2310>, zuletzt geprüft am 10.04.2018.

VCD (2018): VCD Jahresbilanz. 2015/2016. Hg. v. Verkehrsclub Deutschland e. V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Publikationsdatenbank/VCD/VCD_Jahresbilanz_2015_2016.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2018.

VDB (2010): Die Bahnindustrie in Deutschland. Mit exzellenten und wirtschaftlichen Bahnsystemen für mehr nachhaltigen Verkehr auf der Schiene. Hg. v. Verband der Bahnindustrie in Deutschland (VDB) e. V. Berlin. Online verfügbar unter http://bahnindustrie.info/fileadmin/Informationsmaterial/VDB-Imagebroschuere_DE.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2017.

VDI; VPI (2013): Lärminderung beschleunigen. Der Vorschlag des deutschen Schienengüterverkehrssektors. Hg. v. Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und Vereinigung der Privatgüterwagen-Interessenten (VPI). Online verfügbar unter <https://www.vdv.de/positionensuche.aspx?mode=detail&id=8809ED36-9001-4BC8-B336-161EC53FA3AF>, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

VDV (2014): Schienenlärm ehrgeizig mindern, Schienengüterverkehr nicht die Grundlage entziehen. Hg. v. Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.vdv.de/pm-141021-vdv-vpi-und-bdi-gutachten-schienenlaerm-final.pdf>, zuletzt geprüft am 28.09.2017.

VDV (2016): Jahresbericht 2015/2016. Hg. v. Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Köln. Online verfügbar unter <https://www.vdv.de/jahresbericht---statistik.aspx>, zuletzt geprüft am 23.03.2017.

VIA Consulting & Development GmbH; Railistics GmbH (2014): Folgen von Geschwindigkeitsbeschränkungen für den Schienengüterverkehr aus Lärmschutzgründen. Online verfügbar unter <https://www.vdv.de/experteninformationen-schienengueterverkehr.aspx?opentab=1&id=d566c120-d511-4eba-b6b4-8395e15fc918&mode1=detail>, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

Voith (2012): Vorsprung durch Forschung. Das Projekt Ecuquest. Hg. v. Voith Turbo GmbH & Co. KG. Heidenheim. Online verfügbar unter http://www.voith.com/en/1962_d_2012-07-31-g2283-ecoquest_d_screen.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.

VPI (2016): Jahresbericht 2015. Hg. v. Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e. V. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.vpihamburg.de/downloadbereich/oeffentlich/publikationen/jahresbericht>, zuletzt geprüft am 23.03.2017.

VRR (2016): Die S-Bahn Rhein-Ruhr. Mobilität für die Metropolregion Rhein-Ruhr. Hg. v. Verkehrsverbund Rhein-Ruhr AöR. Gelsenkirchen. Online verfügbar unter http://mediocenter.vrr.de/asset/document/broschuere_s_bahn_rhein_ruhr.pdf, zuletzt geprüft am 11.04.2017.

Walther, Klaus (1991): Massnahmenreagibler Modal-Split für den städtischen Personenverkehr: theoretische Grundlagen und praktische Anwendung. Aachen (45).

WHO (2011): Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. Hg. v. World Health Organization. Online verfügbar unter http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf, zuletzt geprüft am 28.09.2017.

Wölfel, Bernd (2013): Vergabe im Wettbewerb – die unternehmerische Leistung zählt? Vergabe von ÖPNV-Leistungen als strategischer Prozess. Hg. v. DB Regio AG. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.vdv.de/130911-vergabe-im-wettbewerb.pdf?forced=true>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

WSV (2014): Binnenschiff und Umwelt. Das Verkehrssystem Binnenschiff / Wasserstraße ist umweltfreundlich, kostengünstig und sicher. Hg. v. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Online verfügbar unter https://www.wsv.de/Schifffahrt/Binnenschiff_und_Umwelt/, zuletzt aktualisiert am 25.09.2014, zuletzt geprüft am 03.02.2018.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Aktive und passive Schallschutzmaßnahmen (Deutsche Bahn AG 2017a).....	6
Abbildung 3-1: Hörbarer Amplitudenbereich (Kloepfer et al. 2006)	22
Abbildung 3-2: Längenbezogene Schallleistungspegel eines HGV-Triebzuges in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (nach BMVI 2015a).....	24
Abbildung 3-3: Vier verschiedene Minderungsszenarien (Kloepfer et al. 2006).....	25
Abbildung 3-4: Sperrzeit eines Blockabschnitts (Pachl 2016)	39
Abbildung 3-5: Zusammenhang zwischen Betriebsqualität und Belastung (DB Netz AG 2008)	40
Abbildung 3-6: Übersichtsbild der Kostenarten eines EIU und EVU (eigene Darstellung)	45
Abbildung 4-1: Übersicht über Maßnahmenarten zur Schallreduktion (eigene Darstellung)	47
Abbildung 4-2: Schallreduktion nach Ort (eigene Darstellung)	48
Abbildung 4-3: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung).....	52
Abbildung 5-1: Top-Down (eigene Darstellung)	54
Abbildung 5-2: Bottom-Up (eigene Darstellung).....	55
Abbildung 5-3: Übersichtsbild zu den Maßnahmenarten (eigene Darstellung)	57
Abbildung 7-1: Fahrzustände einer Zugfahrt (nach Pachl 2016)	75
Abbildung 9-1: Bewertung Haltezeiten im Verhältnis zu Fahrzeit und Reiseweite (Rittner 2012)	114
Abbildung 9-2: Gegenüberstellung der Graphen für Ausgangszugkraft und verringerte Zugkraft (eigene Darstellung)	123
Abbildung 10-1: Beispielstrecke (DB Netz AG 2009b)	130
Abbildung 10-2: Screenshot des Tools zur Berechnung der Fahrzeit (Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik 2015)	133
Abbildung 10-3: Screenshot des Tools zur Berechnung des Schallpegels (Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik 2016a).....	138
Abbildung 10-4: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}): Gegenüberstellung der Modellzüge 15 und 21 (eigene Darstellung)	149
Abbildung 10-5: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Gegenüberstellung der Modellzüge 15 und 21 (eigene Darstellung)	160
Abbildung 12-1: Geschw.-profil: Gegenüberstellung Ausgangszugfahrt und konstante Fahrt (eigene Darstellung)	188



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Minderungspotenzial und Kosten der Lärminderung durch technische Maßnahmen an der Infrastruktur (Kosten pro dB(A) Lärminderung und Jahr und Infrastruktur-km) durch Maßnahmen an der Infrastruktur (BMVI 2015a), (UBA 2017a)	6
Tabelle 2-2: Kosten für ein Standardfenster je Schallschutzklasse (Kloepfer et al. 2006)	7
Tabelle 2-3: Minderungspotenzial durch Maßnahmen am Fahrzeug (UBA 2017a), (Voith 2012)	8
Tabelle 2-4: Kosten Lärminderung durch technische Maßnahmen an Lokomotive und Güterwagen (Kosten pro dB(A) Lärminderung und Jahr und Lokomotive/Güterwagen) (UBA 2017a)	8
Tabelle 2-5: Kurz- bis langfristige Lärminderungspotenzial im Luftverkehr ((Kloepfer et al. 2006), (DLR 2007))	10
Tabelle 2-6: Minderungspotenziale ausgewählter Maßnahmen bei verschiedenen Verkehrsträgern....	13
Tabelle 2-7: Vergleichbare Maßnahmen bei verschiedenen Verkehrsträgern (eigene Darstellung)	14
Tabelle 3-1: Beispiele für typische Schallereignisse (BMVI 2016a)	23
Tabelle 3-2: Pegeländerung und Wahrnehmung in Abhängigkeit der Schallquellenanzahl (BMVI 2016a)	24
Tabelle 3-3: Immissionsgrenzwerte nach Schall 03 (BMUB 2014)	27
Tabelle 3-4: Inhalte der Finanzbuchhaltung und Kosten- und Leistungsrechnung (Jackisch 2006)	42
Tabelle 3-5: Kostendifferenzierung nach EIU und EVU	43
Tabelle 4-1: Begriffsbezeichnungen des rollenden Materials (Deutsches Institut für Normung e. V. 2003)	50
Tabelle 5-1: Instrumente der Lärmpolitik (Kloepfer et al. 2006).....	61
Tabelle 6-1: Kombinationen und Ergebnisse des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (eigene Darstellung) ...	65
Tabelle 6-2: Bereinigte Kombinationen und Ergebnisse des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (eigene Darstellung)	65
Tabelle 6-3: Ergebnisse und Kombinationen des Kriteriums Umsetzbarkeit (eigene Darstellung)	66
Tabelle 8-1: Übersicht über die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten	84
Tabelle 9-1: Erzeugerpreisindex für die Komponenten des Oberbaus (Lienau 2006), (Statistisches Bundesamt 2017b).....	90
Tabelle 9-2: Bestimmung des Herstellkostensatzes für das Jahr 2016 (Lienau 2006), (Statistisches Bundesamt 2017b).....	90
Tabelle 9-3: Relative Kostensätze für Instandhaltung von Schienenfahrzeugen (Dickenbrok 2012)	98
Tabelle 9-4: Jährliche Laufleistungen und Einsatzzeiten von Fahrzeugen (Dickenbrok 2012)	98
Tabelle 9-5: Bestimmung des Herstellkostensatzes für das Jahr 2016 (Dickenbrok 2012), (Statistisches Bundesamt 2017b).....	100
Tabelle 9-6: Berechnung der Nettojahresarbeitszeit (Dickenbrok 2012)	103
Tabelle 9-7: Bestimmung des Kostensatzes für Bahnstrom	105
Tabelle 9-8: Werte für Qualitätsfaktor q_Q (DB Netz AG 2008)	109
Tabelle 9-9: Zuggattungsspezifischer Fahrzeitbewertungsfaktor (Jochim 1999)	116
Tabelle 9-10: Parameter für Verspätungsbewertungsfunktion (Jochim 1999)	117
Tabelle 9-11: Faktor zur Berücksichtigung der Schallpegelveränderung (eigene Darstellung)	122
Tabelle 9-12: Umsetzbarkeit der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten	125

Tabelle 9-13: Kombinationsmöglichkeiten der weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten (eigene Darstellung).....	126
Tabelle 10-1: Übersicht über die weiter zu untersuchenden Maßnahmenarten.....	129
Tabelle 10-2: Einflussgrößen zur Berechnung der Fahr- und Mindestzugfolgezeiten	131
Tabelle 10-3: Höchstgeschwindigkeiten und Ausgangsfahrzeiten.....	132
Tabelle 10-4: Wahrscheinlichkeiten der Zugfolgefälle	134
Tabelle 10-5: Mindestzugfolgezeiten aller möglichen Zugfolgefälle	134
Tabelle 10-6: Anzahlen aller möglichen Zugfolgefälle	135
Tabelle 10-7: Summen der Mindestzugfolgezeiten über die Anzahl aller möglichen Zugfolgefälle	135
Tabelle 10-8: Beispiel: Beharren mit geringerer Höchstgeschwindigkeit	137
Tabelle 10-9: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen...: Modellzüge mit Variation der Wagenanzahl.....	140
Tabelle 10-10: Parameter zur Berechnung der Instandhaltungskosten der Güterwagen (Dickenbrok 2012), (Statistisches Bundesamt 2017b)	141
Tabelle 10-11: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen und ...: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug)	142
Tabelle 10-12: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen und ...: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	142
Tabelle 10-13: Art der Wagen – nur leise und neue Wagen ...: Kriterien und monetäre Bewertung ..	143
Tabelle 10-14: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Modellzüge mit Variation der Anfahrzugkraft	144
Tabelle 10-15: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Modellzüge und Schallpegelminderung ..	145
Tabelle 10-16: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse ..	146
Tabelle 10-17: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	146
Tabelle 10-18: Beschleunigen – geringere Beschleunigung: Kriterien und monetäre Bewertung.....	147
Tabelle 10-19: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}): Modellzüge mit Variation der Höchstgeschwindigkeit	148
Tabelle 10-20: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}): Modellzüge und Schallpegelminderung	149
Tabelle 10-21: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}): Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug)	150
Tabelle 10-22: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}): Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	150
Tabelle 10-23: Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}): Kriterien und monetäre Bewertung	151
Tabelle 10-24: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) ausnutzen: Modellzüge mit Variation der Höchstgeschwindigkeit	152
Tabelle 10-25: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) ausnutzen: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug)	153
Tabelle 10-26: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) ausnutzen: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	154

Tabelle 10-27: Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen: Kriterien und monetäre Bewertung.....	155
Tabelle 10-28: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Modellzüge mit Variation der Höchstgeschwindigkeit	156
Tabelle 10-29: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse (Auszug)	157
Tabelle 10-30: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme.....	157
Tabelle 10-31: Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}): Kriterien und monetäre Bewertung.....	158
Tabelle 10-32: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Modellzüge mit Variation der Geschwindigkeit	159
Tabelle 10-33: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Modellzüge und Schallpegelminderung	160
Tabelle 10-34: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse (Auszug) ...	161
Tabelle 10-35: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	161
Tabelle 10-36: Auslaufen – Auslaufen nutzen: Kriterien und monetäre Bewertung	162
Tabelle 10-37: Bremsen – geringere Beschleunigung: Modellzüge mit Variation der Bremskraft	163
Tabelle 10-38: Bremsen – geringere Beschleunigung: Modellzüge und Schallpegelminderung	164
Tabelle 10-39: Bremsen – geringere Beschleunigung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse	165
Tabelle 10-40: Bremsen – geringere Beschleunigung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme.....	165
Tabelle 10-41: Bremsen – geringere Beschleunigung: Kriterien und monetäre Bewertung.....	166
Tabelle 10-42: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Modellzüge mit Variation der Wagenanzahl	167
Tabelle 10-43: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Modellzüge und Schallpegelminderung	168
Tabelle 10-44: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme.....	169
Tabelle 10-45: Geschw.-profil – schallarmes Geschw.-profil...: Kriterien und monetäre Bewertung..	169
Tabelle 10-46: Regelzuschläge für Güterzüge und Triebfahrzeugfahrten (DB Netz AG 2009a)	170
Tabelle 10-47: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Modellzüge und Schallpegelminderung	171
Tabelle 10-48: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse (Auszug)	172
Tabelle 10-49: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme.....	172
Tabelle 10-50: Geschw.-profil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung: Kriterien und monetäre Bewertung.....	173
Tabelle 10-51: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Fahrzeiten der Ausgangsstrecke und Umleitungsstrecke.....	174
Tabelle 10-52: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Schallpegel für Ausgangs- und Umleitungsstrecke.....	175
Tabelle 10-53: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme.....	175

Tabelle 10-54: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots: Kriterien und monetäre Bewertung	176
Tabelle 11-1: Nutzen-Kosten-Verhältnisse der untersuchten Maßnahmenarten	179
Tabelle 12-1: Eigenschaften des Güterzuges.....	182
Tabelle 12-2: Änderung des Wagenzuges: Zugkonfigurationen SGV und Ergebnisse	184
Tabelle 12-3: Änderung des Wagenzuges: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	185
Tabelle 12-4: Änderung des Wagenzuges: Kriterien und monetäre Bewertung	185
Tabelle 12-5: Fahrzeitveränderung: Modellzüge und Schallpegelminderung	186
Tabelle 12-6: Fahrzeitveränderung: Zugkonfiguration SGV und Ergebnisse.....	186
Tabelle 12-7: Fahrzeitveränderung: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	187
Tabelle 12-8: Fahrzeitveränderung: Kriterien und monetäre Bewertung	187
Tabelle 12-9: Geschw.-profil: Modellzüge und Schallpegelminderung	188
Tabelle 12-10: Geschw.-profil: Abstände ohne und mit Anwendung der Maßnahme	189
Tabelle 12-11: Geschw.-profil: Kriterien und monetäre Bewertung.....	189

Anlagen

Anlage 1: Maßnahmenarten aus Brainstorming	III
Anlage 2: Maßnahmenarten mit jeweiligen Unter- und Oberthemen.....	V
Anlage 3: Steckbriefe: Änderung des Triebfahrzeuges	VII
Anlage 4: Steckbriefe: Änderung des Wagenzuges.....	XIII
Anlage 5: Steckbriefe: Fahrzeitveränderung	XXIII
Anlage 6: Steckbrief: Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume.....	XLIX
Anlage 7: Steckbriefe: Änderung des Laufwegs.....	LIII
Anlage 8: Steckbriefe: (Teil-)Ausfall	LVII
Anlage 9: Grobbewertung der Maßnahmenarten	LXI
Anlage 10: Mittlere Mindestzugfolgezeiten, mittlere Folgeverspätungen und Nennleistungen	LXV
Anlage 11: Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Wagen.....	LXXIII
Anlage 12: Fahrzeitveränderung – Beschleunigen – geringere Beschleunigung	LXXVII
Anlage 13: Fahrzeitveränderung – Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}).....	LXXIX
Anlage 14: Fahrzeitveränderung – Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen.....	LXXXIII
Anlage 15: Fahrzeitveränderung – Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}).....	LXXXVII
Anlage 16: Fahrzeitveränderung – Auslaufen – Auslaufen nutzen	XCI
Anlage 17: Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung	XCIV
Anlage 18: Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben	XCVII
Anlage 19: Geschwindigkeitsprofil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung	CIII
Anlage 20: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots.....	CV
Anlage 21: Steckbriefe der realen Strecken.....	CVII



Anlage 1: Maßnahmenarten aus Brainstorming

- nur E-Loks
- mehr neue E-Loks
- (alte) Diesel tags
- E-Loks nachts
- keine Diesel mehr
- Zweikraftlok: Diesel und E-Lok
- Zweikraftlok: E-Lok und Brennstoffzelle
- Zweikraftlok: ...
- Abschaltung von einzelnen Motoren
- negativen Schall durch positiven Schall übertönen
- 1 E-Lok statt 2 Diesel
- leisere und leistungsfähigere Loks
- leisere Loks
- leistungsfähigere Loks
- Zugspitze und Zugende
- Zugspitze und Zugmitte
- Zugspitze, Zugmitte und Zugende
- Doppeltraktion
- nur neue Bremsen
- mehr neue Bremsen als alte
- alte Bremsen tags
- neue Bremsen nachts
- neue Bremssysteme
- mehr leise/neue Bremsen
- weniger laute/alte Bremsen
- bessere Bremsen
- vorne laut/hinten leise
- hinten laut/vorne leise
- Bremsarten bündeln
- komplett leiser Zug
- mehr neue Wagen
- alte Wagen tags
- neue Wagen nachts
- Container bevorzugen auf schallintensiven Strecken
- bestimmte Wagen auf bestimmte Strecken
- Güterzüge nachts ausschließlich auf HGV-Strecken
- maximal mögliche Länge ausnutzen
- kürzere Züge tags (z. B. Doppelstock)/kürzere Züge nachts (z. B. Doppelstock)
- längere Züge tags/längere Züge nachts
- große Wagen vorn
- kleine Wagen hinten
- homogene Züge (Begrenzung der Typen pro Zug)
- Aerodynamik

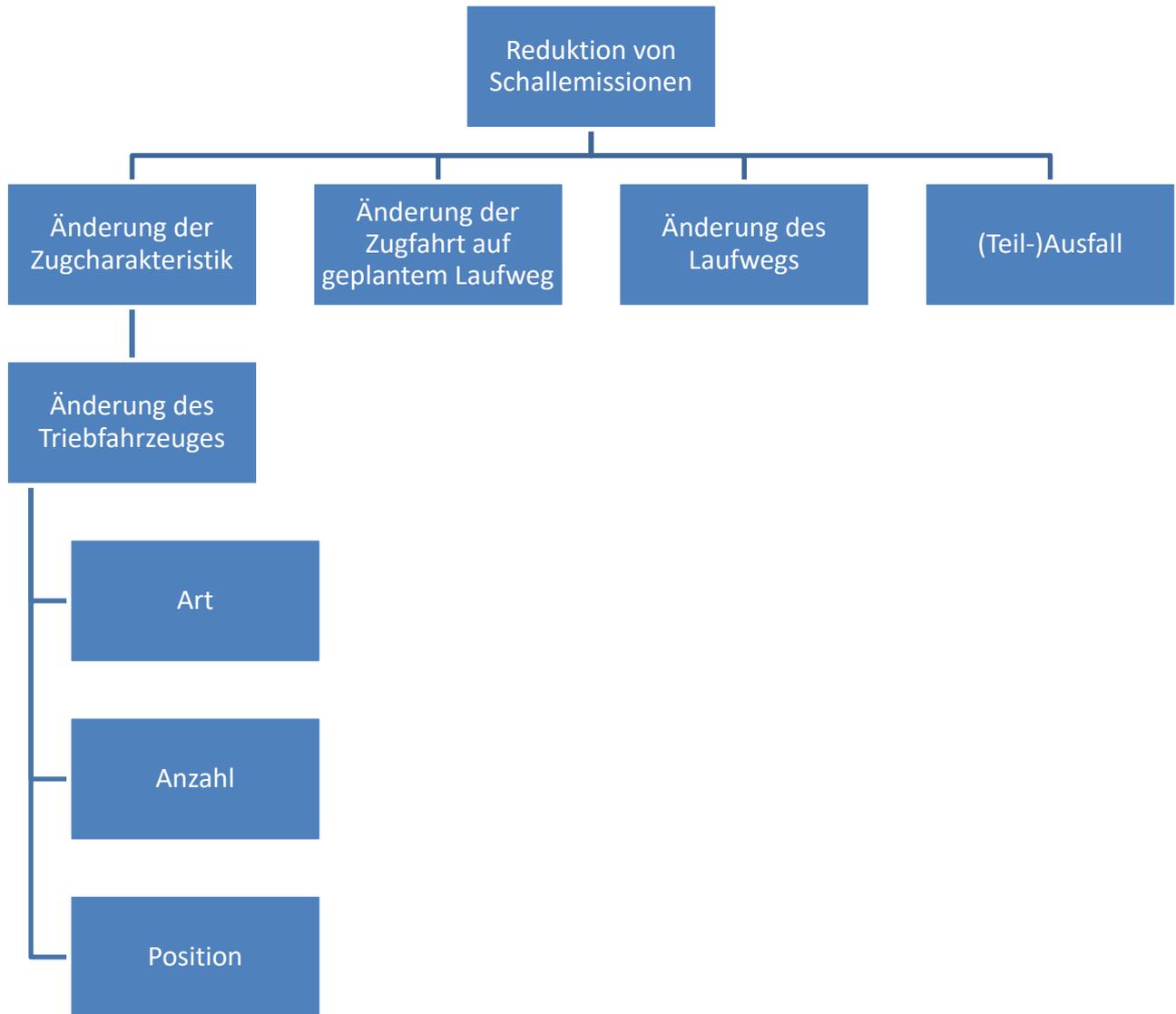
-
- schwere Wagen hinter der Lok, leichte am Zugende
 - maximal mögliches Gewicht ausnutzen
 - höheres Gewicht
 - geringeres Gewicht
 - Verteilung des Gewichts
 - schneller Beschleunigen/langsamer Beschleunigen/gleichmäßig Beschleunigen
 - geringeres v_{\max}
 - Harmonisierung
 - definierte Beschleunigungsorte
 - definierte Beharrungsorte
 - Ausrollen nutzen
 - früher ausrollen
 - definierte Ausrollorte
 - schneller Bremsen/langsamer Bremsen
 - gleichmäßig Bremsen
 - nicht im bebautem Gebiet
 - definierte Bremsorte
 - Halt weglassen
 - Halt verkürzen (Lüfter)
 - VzG harmonisieren
 - Grüne Welle
 - Runtersignalisierung vermeiden
 - homogene Geschwindigkeitssignalisierung
 - Zeitfenster für Güterzüge definieren
 - Stark biegen auf nicht ausgelasteten Strecken
 - "Schallzeit" + "Ruhezeit"
 - Kreuzen im bewohntem Gebiet
 - Personenverkehr: +/- 3 Minuten
 - Übrige Verkehre: +/- 30 Minuten
 - Personenverkehr: größer +/- 3 Minuten
 - Übrige Verkehre: größer +/- 30 Minuten
 - höhere Pufferzeiten/höhere Pufferzeiten nachts/höhere Pufferzeiten tags
 - keine Mehrbelastung bei Nachtbaustellen
 - Parallelfahrten zulassen
 - "Schallregion" + "Ruheregion"
 - automatische Fahrplan-Mitteilung
 - automatische Stellung des Hauptsignals
 - Bauarbeiten, Betriebsstörungen UND Schallemissionen berücksichtigen
 - Leerfahrten vermeiden
 - Bündelung von halbvollen Zügen zu einem
 - Züge abschnittsweise kuppeln
 - nach Erreichen eines Schallkontingents je EVU
 - nach Erreichen eines Schallkontingents je Strecke

Anlage 2: Maßnahmenarten mit jeweiligen Unter- und Oberthemen

Oberthema	Unterthema	Kategorie	Maßnahmenart
Änderung der Zug-charakteristik	Änderung des Triebfahrzeuges	Art	mehr E-Traktion statt V-Traktion
			einzelne Schallquellen am Fahrzeug zeitweise eliminieren
			Zweikraftlok: E-Lok oder Brennstoffzelle zusätzlich
		Anzahl	weniger Triebfahrzeuge durch mehr Leistung pro Triebfahrzeug
	Position	Zugspitze und Zugende/Zugspitze und Zugmitte/Doppeltraktion	
	Änderung des Wagenzuges	Art der Wagen	nur leise und neue Wagen und keine lauten und alten Wagen
			nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen
			Kombination aus leisen und lauten Wagen
		Anzahl der Wagen	minimale Länge des Zuges
			abgestimmte Länge des Zuges
			Bündelung von halblangen Zügen zu einem Zug
		Position	Wagenarten bündeln: z. B. vorne laut/hinten leise
			Bremsarten bündeln: z. B. vorne laut/hinten leise
Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg	Fahrzeit-veränderung	Beschleunigen	geringere Beschleunigung
			geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})
			Harmonisierung der Beschleunigungsphasen
		Beharren	Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) ausnutzen
			geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})
			Harmonisierung der Beharrungsphasen
		Auslaufen	Auslaufen nutzen
			Harmonisierung der Auslaufphasen
		Bremsen	geringere Beschleunigung
			Harmonisierung der Bremsphasen
		Halt	Harmonisierung der Halte

Änderung der Zugfahrt auf geplantem Laufweg	Fahrzeitveränderung	Geschwindigkeitsprofil	schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)
			Weiterentwicklung der Zuglaufregelung
	Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktions-spielräume	-	Konstruktion Schienengüterverkehr ohne Überholung
Änderung des Laufweges	Umleitung unter erleichterten Bedingungen/ Umleitung	-	Parallelfahrten zulassen
			Umfahren von Lärmhotspots
			Bauarbeiten, Betriebsstörungen oder Schallemissionen berücksichtigen
(Teil-) Ausfall	Teilausfall/ Ausfall	-	Leerfahrten vermeiden
			Züge abschnittsweise kuppeln

Anlage 3: Steckbriefe: Änderung des Triebfahrzeuges



Art: „mehr E-Traktion statt V-Traktion“

1. Beschreibung

Die Maßnahmenart zielt auf die Verringerung der Verbrennungsfahrzeuge ab. Dies kann bereits in der Planung erfolgen, indem elektrische Traktionen bevorzugt werden. Um mit elektrischer Traktion fahren zu können, muss eine Oberleitung vorhanden sein und das Triebfahrzeug die anliegende Spannung verarbeiten können. Es wird angenommen, dass E-Loks einen geringeren Schallpegel erzeugen als V-Loks. Hinzu kommen die Abgasbelastung und das bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehende Kohlenstoffdioxid (CO₂). Die Deutsche Bahn AG möchte die CO₂-Emissionen senken und setzt daher schon heute im Schienenpersonenverkehr auf die Verwendung von Ökostrom. Diesen möchte sie auch auf die anderen Verkehre übertragen und deren Anteil sukzessive steigern.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als sehr hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die bestehenden Triebfahrzeuge umgerüstet werden, sodass diese weniger CO₂-Emissionen ausstoßen. Zum anderen müssen neue Triebfahrzeuge beschafft werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt. Dies hängt u. a. von den eingesetzten Triebfahrzeugen und deren Leistungsvermögen ab. Demgegenüber können leistungsfähigere Triebfahrzeuge eingesetzt werden, um z. B. eine Erhöhung der Kapazität zu erreichen.

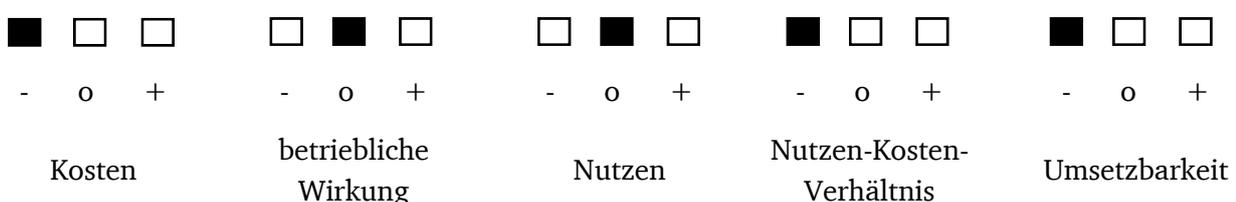
4. Nutzen

Obwohl, wie oben erwähnt, davon ausgegangen werden kann, dass E-Loks einen geringeren Schallpegel aufweisen als V-Loks, ist die zu erreichende dB(A)-Reduktion als gering einzuschätzen. Dies hängt damit zusammen, dass nicht immer Verbrennungsfahrzeuge ersetzt werden können und ab einer gewissen Zuglänge und Geschwindigkeit das Triebfahrzeug einen sehr geringen Beitrag zur Schallemission leistet.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da zum einen eine Oberleitung vorhanden sein muss. Zum anderen nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Triebfahrzeuge ersetzt werden können.

6. Grobbewertung



Art: „einzelne Schallquellen am Fahrzeug zeitweise eliminieren“

1. Beschreibung

Die Maßnahmenart zielt auf die zeitweise Eliminierung einzelner Schallquellen am Fahrzeug ab. Dazu zählen z. B. Lüfter oder Kompressoren. Dies kann bei Einfahrt in eine Betriebsstelle oder beim Abstellen des Triebfahrzeugs erfolgen. Dazu muss die Position des Triebfahrzeugs bekannt sein, damit die Abschaltung entsprechend erfolgen kann. Mit der Abschaltung wird eine Reduktion der Schallemissionen erreicht. Darüber hinaus könnte auch eine Energieeinsparung erreicht werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die bestehenden Triebfahrzeuge umgerüstet werden, sodass die Schallquellen gezielt und ortsabhängig angesteuert werden können. Zum anderen müssen neue Triebfahrzeuge beschafft werden, um u. a. alte Triebfahrzeuge zu ersetzen, bei denen eine Umrüstung nicht möglich ist.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

4. Nutzen

Obwohl, wie oben erwähnt, die Schallemissionen reduziert werden, ist die zu erreichende dB(A)-Reduktion als gering einzuschätzen. Dies hängt u. a. damit zusammen, dass nicht sofort alle Triebfahrzeuge umgerüstet bzw. ersetzt werden können und eine Eliminierung zeitlich nicht immer möglich ist.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da die Abschaltung einzelner Schallquellen jederzeit erfolgen kann. Die Umsetzung der Maßnahmenart nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Triebfahrzeuge umgerüstet werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Art: „Zweikraftlok: E-Lok oder Brennstoffzelle zusätzlich“

1. Beschreibung

Die Maßnahmenart zielt auf den Einsatz von Zweikraftlokomotiven ab. Dabei kann eine E-Lok zusätzlich mit einer Brennstoffzelle ausgestattet werden. Diese Lokomotiven können dann bei der Planung (siehe Steckbrief „mehr E-Traktion statt V-Traktion“) bevorzugt werden. Damit kann sowohl eine Schallreduktion als auch eine Verringerung des Energieverbrauchs erreicht werden. Somit kann zum einen, je nach Standort, entweder die E-Traktion oder die Brennstoffzelle genutzt werden. Zum anderen fahren die Züge umweltfreundlicher und könnten sich gegenüber dem Straßen- und Luftverkehr einen weiteren Vorteil verschaffen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als sehr hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die bestehenden Triebfahrzeuge umgerüstet werden (z. B. Einbau der Brennstoffzelle). Zum anderen müssen neue Triebfahrzeuge beschafft werden, um u. a. alte Triebfahrzeuge zu ersetzen, bei denen eine Umrüstung nicht möglich ist.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

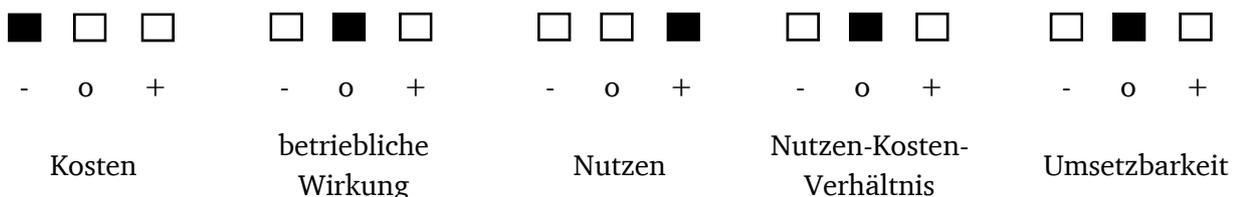
4. Nutzen

Die zu erreichende dB(A)-Reduktion ist als hoch einzuschätzen, da die Motoren entsprechend des Standortes angesteuert werden könnten.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da die Verwendung eines zusätzlichen Motors jederzeit erfolgen kann. Die Umsetzung der Maßnahmenart nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Triebfahrzeuge umgerüstet werden können.

6. Grobbewertung



Anzahl: „weniger Triebfahrzeuge durch mehr Leistung pro Triebfahrzeug“

1. Beschreibung

Die Maßnahmenart hat die Reduzierung der Menge der Triebfahrzeuge zum Ziel. Dies soll über den Einsatz von leistungstärkeren Triebfahrzeugen sichergestellt werden. In der Planung ist darauf zu achten, eben diese Triebfahrzeuge bevorzugt einzuplanen und somit auch einzusetzen. So können z. B. Doppeltraktionen bei Zügen vermieden werden. Die Wahl des Triebfahrzeuges sollte von der Masse des Wagenzuges und der zu befahrenden Strecke abhängen, um das optimale Triebfahrzeug hinsichtlich der Leistung einzusetzen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen alle bestehenden Triebfahrzeuge erfasst und deren Einsatz entsprechend geplant werden. Zum anderen müssen neue Fahrzeuge beschafft werden, um entsprechend höhere Leistungen zur Verfügung zu haben.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt. Dies hängt u. a. von den eingesetzten Triebfahrzeugen und deren Leistungsvermögen ab. Demgegenüber können leistungsfähigere Triebfahrzeuge eingesetzt werden, um z. B. eine Erhöhung der Kapazität zu erreichen.

4. Nutzen

Obwohl, wie oben erwähnt, davon ausgegangen werden kann, dass weniger Triebfahrzeuge einen geringeren Schallpegel aufweisen, ist die zu erreichende dB(A)-Reduktion als gering einzuschätzen. Dies hängt u. a. damit zusammen, dass nicht sofort alle Triebfahrzeuge einsatzbereit bzw. ersetzt werden können.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da der Einsatz leistungstärkerer Triebfahrzeuge jederzeit erfolgen kann. Die Umsetzung der Maßnahmenart nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Triebfahrzeuge ersetzt werden können.

6. Grobbewertung

- o +

Kosten

- o +

betriebliche
Wirkung

- o +

Nutzen

- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis

- o +

Umsetzbarkeit

Position: „Zugspitze und Zugende/Zugspitze und Zugmitte/Doppeltraktion“

1. Beschreibung

Die Maßnahmenart zielt auf die Positionierung der Triebfahrzeuge ab. Dabei können mehrere Triebfahrzeuge folgende Positionen einnehmen:

- Zugspitze und Zugende
- Zugspitze und Zugmitte
- Doppeltraktion

Bei der Bewertung der Maßnahmenart wird zwischen den verschiedenen Positionen nicht unterschieden. Die Ausprägung Zugspitze und Zugende sowie Doppeltraktion werden bereits heute eingesetzt. Es besteht allerdings noch Handlungsbedarf hinsichtlich des optimalen Einsatzes. Bei Fahrt mit Doppeltraktion muss eine entsprechende Auslastung der Motoren sichergestellt werden. Das bedeutet umgekehrt, dass eine Zugfahrt mit mehreren Traktionen vermieden werden kann, wenn z. B. der Wagenzug entsprechend angepasst oder ein leistungsstärkeres Triebfahrzeug (siehe Maßnahmenart „weniger Triebfahrzeuge durch mehr Leistung pro Triebfahrzeug“) eingesetzt wird.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. So müssen alle bestehenden Triebfahrzeuge erfasst und deren Einsatz entsprechend geplant werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt. Dies hängt u. a. von den eingesetzten Triebfahrzeugen, deren Menge und deren Leistungsvermögen ab. Demgegenüber können leistungsfähigere Triebfahrzeuge eingesetzt werden, um z. B. eine Erhöhung der Kapazität zu erreichen.

4. Nutzen

Die zu erreichende dB(A)-Reduktion durch eine geänderte Positionierung der Triebfahrzeuge ist als gering einzuschätzen.

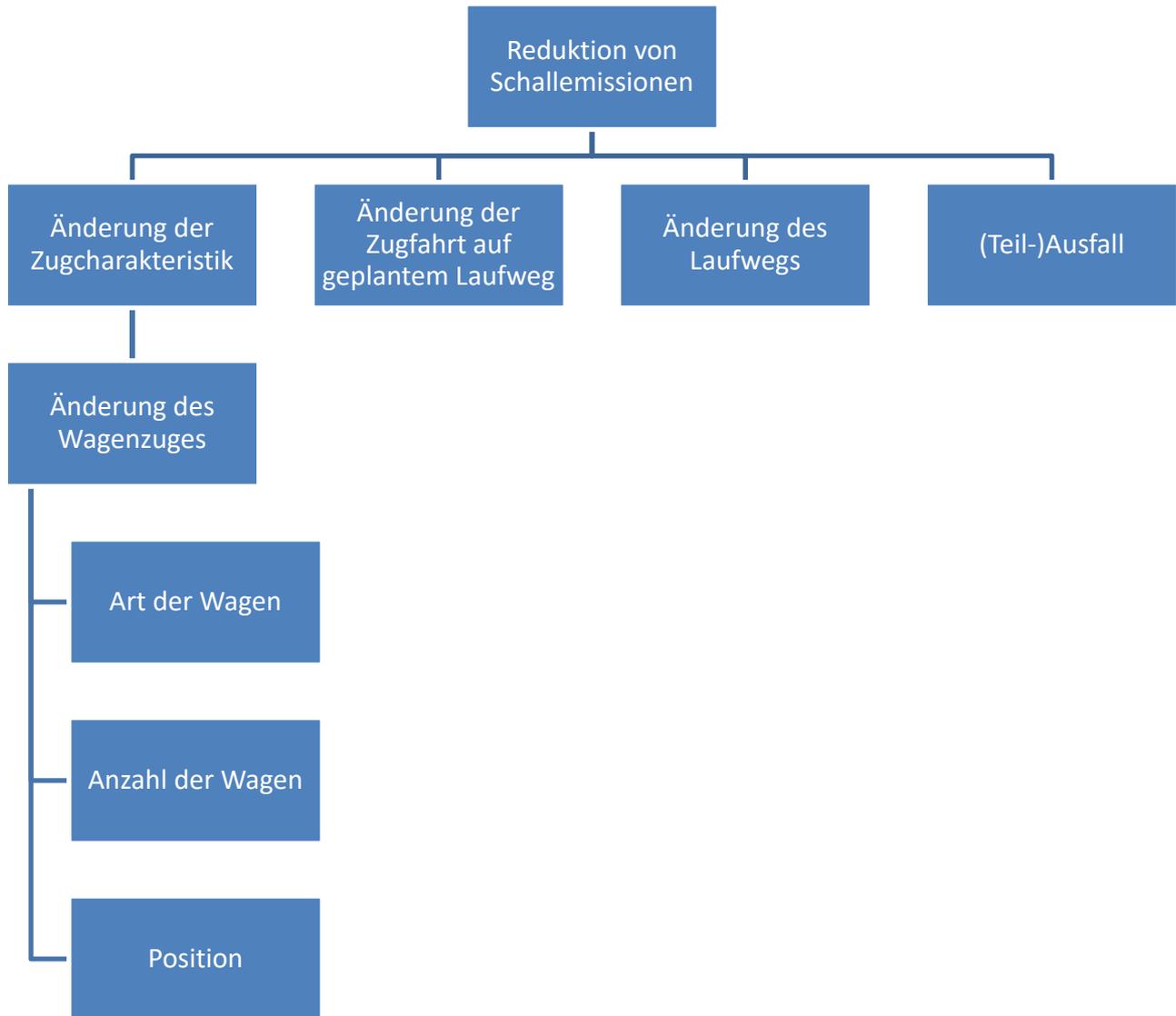
5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da der Einsatz von mehreren Triebfahrzeugen jederzeit erfolgen kann. Die Umsetzung der Maßnahmenart nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Triebfahrzeuge ersetzt werden können.

6. Grobbewertung

<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
-	o	+	-	o	+	-	o	+	-	o	+			
Kosten			betriebliche Wirkung			Nutzen			Nutzen-Kosten-Verhältnis			Umsetzbarkeit		

Anlage 4: Steckbriefe: Änderung des Wagenzuges



Art der Wagen: „nur leise und neue Wagen und keine lauten und alten Wagen“

1. Beschreibung

Sind genügend Wagen mit einer bestimmten Eigenschaft vorhanden, so können daraus Gruppen innerhalb eines Zuges gebildet werden. Dies gilt sowohl für Wagen die das Schallniveau positiv, als auch negativ beeinflussen. Somit können Gruppen mit z.B. einheitlicher Wagengröße, -form oder -material gebildet werden. Des Weiteren können Gruppen aus rein lauten oder leisen Wagen zusammengestellt werden. Es wird angenommen, dass die Schallreduktion mit zunehmender Homogenität steigt.

Die Maßnahmenart zielt auf den bevorzugten Einsatz von leisen und neuen Wagen. Damit soll der Einsatz von lauten und alten Wagen weitestgehend vermieden werden. Der Einsatz kann bereits in der Planung erfolgen, indem auf den Einsatz dieser Wagen geachtet wird. Es wird angenommen, dass Wagen neuerer Bauart eine geringere Schallemission aufweisen als Wagen älterer Bauart.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als sehr hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die bestehenden Wagen entsprechend umgerüstet werden, sodass diese weniger Schallemissionen aufweisen. Zum anderen müssen gegebenenfalls Wagen beschafft werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine Änderung erfährt.

4. Nutzen

Obwohl, wie oben erwähnt, davon ausgegangen werden kann, dass Wagen neuerer Bauart eine geringere Schallemission aufweisen als Wagen älterer Bauart, ist die zu erreichende dB(A)-Reduktion als gering einzuschätzen.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da die jeweiligen Streckenklassen beachtet werden müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Wagen umgerüstet bzw. ersetzt werden können.

6. Grobbewertung

■ □ □
- 0 +

Kosten

□ ■ □
- 0 +

betriebliche
Wirkung

□ ■ □
- 0 +

Nutzen

■ □ □
- 0 +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis

□ ■ □
- 0 +

Umsetzbarkeit

Art der Wagen: „nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen“

1. Beschreibung

Sind genügend Wagen mit einer bestimmten Eigenschaft vorhanden, so können komplette Züge daraus gebildet werden. Dies gilt sowohl für Wagen mit Eigenschaften, die das Schallniveau positiv, als auch negativ beeinflussen. Somit können Züge mit z. B. einheitlicher Wagengröße, -form oder -material gebildet werden. Des Weiteren können Züge aus rein lauten oder leisen Wagen zusammengestellt werden. Es wird angenommen, dass die Schallreduktion mit zunehmender Homogenität steigt.

Der Fokus der Maßnahmenart liegt auf dem Einsatz von Wagen mit leisen und neuen Bremsen gegenüber lauten und alten Bremsen. Die Bremsen älterer Bauart rauhen die Fahrflächen der Radsätze bei Bremsungen auf. Dadurch werden auch die Rauheit der Schiene und die Schallemission erhöht. Dies ist bei Bremsen neuerer Bauart nicht der Fall. Der Einsatz dieser Maßnahmenart kann bereits in der Planung erfolgen. Es wird angenommen, dass Wagen mit neueren Bremsen eine geringere Schallemission aufweisen als Wagen mit Bremsen älterer Bauart.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. So müssen die bestehenden Wagen mit neuen Bremsen ausgerüstet werden, um eine Schallreduktion zu erreichen.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine Änderung erfährt.

4. Nutzen

Wie oben erwähnt, kann davon ausgegangen werden, dass Bremsen neuerer Bauart eine geringere Schallemission aufweisen. Damit kann eine hohe dB(A)-Reduktion erreicht werden. Zum einen werden durch die neuen Bremsen die Fahrflächen der Räder weniger stark aufgeraut und so ein ruhigeres Laufverhalten erreicht. Zum anderen reduziert sich die Schallemission beim Bremsen.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da die jeweiligen Bremshundertstel beachtet werden müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Wagen ersetzt werden können.

6. Grobbewertung

- o +

Kosten

- o +

betriebliche
Wirkung

- o +

Nutzen

- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis

- o +

Umsetzbarkeit

Art der Wagen: „Kombination aus leisen und lauten Wagen“

1. Beschreibung

Sind genügend Wagen mit einer bestimmten Eigenschaft vorhanden, so können komplette Züge daraus gebildet werden. Dies gilt sowohl für Wagen mit Eigenschaften, die das Schallniveau positiv, als auch negativ beeinflussen. Somit können Züge mit z. B. einheitlicher Wagengröße, -form oder -material gebildet werden. Des Weiteren können Züge aus rein leisen oder lauten Wagen zusammengestellt werden. Es wird angenommen, dass die Schallreduktion mit zunehmender Homogenität steigt.

Die Maßnahmenart ist eine Kombination aus den Maßnahmenarten „nur leise und neue Wagen und keine lauten und alten Wagen“ und „nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen“. Es werden leise und laute Wagen in einem Zug kombiniert. Die Ursachen der Lautstärkeunterschiede spielen dabei keine Rolle. Vielmehr ist hier eine Bündelung der Wagen im Zug gemeint. So können z. B. laute Wagen direkt hinter einem lauten Triebfahrzeug und leise Wagen am Ende des Zuges angeordnet werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen, da die Zugbildung aufwendiger wird und längere Zeit in Anspruch nimmt.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine Änderung erfährt.

4. Nutzen

Obwohl, wie oben erwähnt, davon ausgegangen werden kann, dass Wagen neuerer Bauart eine geringere Schallemission aufweisen als Wagen älterer Bauart, ist die zu erreichende dB(A)-Reduktion als gering einzuschätzen.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da die jeweiligen Streckenklassen beachtet werden müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Züge angepasst werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Anzahl der Wagen: „minimale Länge des Zuges“

1. Beschreibung

Bei der Festlegung einer minimalen Zuglänge sollten stets die Strecke und deren Infrastruktureinrichtungen im Blick gehalten werden. Die minimale Zuglänge sollte dabei möglichst komplett ausgenutzt werden. Damit wird sichergestellt, dass keine Kapazitäten der Infrastruktureinrichtungen (z. B. Ausnutzung der Länge von Überholgleisen) ungenutzt bleiben. Inwiefern ein kürzerer Zug positive Auswirkungen auf die Emission als ein längerer Zug besitzt, ist entsprechend zu überprüfen. In jedem Fall müssen die Lärmwirkung und in diesem Zusammenhang die Veränderung des Maximalpegels mit beachtet werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die minimalen Längen für jede Strecke festgelegt und aus den Anmeldungen ein Fahrplan konstruiert werden. Zum anderen müssen die EVU ihre Transportketten entsprechend der geforderten Längen anpassen.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

4. Nutzen

Obwohl die Länge des Zuges im Rahmen der Berechnung der Schall 03 eingeht, ist die dB(A)-Reduktion als gering zu bewerten. Dies liegt darin begründet, dass weitere Einflussparameter (z. B. Geschwindigkeit oder Bremsart) existieren.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da für jede Strecke eine minimale Zuglänge festgelegt werden kann. Die Umsetzung der Maßnahmenart nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Zuglängen angepasst werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Anzahl der Wagen: „abgestimmte Länge des Zuges“

1. Beschreibung

Bei der Festlegung einer abgestimmten Länge des Zuges sollten stets die Strecke und deren Infrastruktureinrichtungen im Blick gehalten werden. Die abgestimmte Zuglänge sollte dabei möglichst komplett ausgenutzt werden. Damit wird sichergestellt, dass keine Kapazitäten der Infrastruktureinrichtungen (z. B. Ausnutzung der Länge von Überholgleisen) ungenutzt bleiben. Inwiefern eine abgestimmte Zuglänge eine positive Auswirkung auf die Emission besitzt, ist entsprechend zu überprüfen. In jedem Fall müssen die Lärmwirkung und in diesem Zusammenhang die Veränderung des Maximalpegels mit beachtet werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die abgestimmten Längen für jede Strecke festgelegt und aus den Anmeldungen ein Fahrplan konstruiert werden. Zum anderen müssen die EVU ihre Transportketten entsprechend der geänderten Längen anpassen.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

4. Nutzen

Obwohl die Länge des Zuges im Rahmen der Berechnung der Schall 03 eingeht, ist die dB(A)-Reduktion als gering zu bewerten. Dies liegt darin begründet, dass weitere Einflussparameter (z. B. Geschwindigkeit oder Bremsart) existieren.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da für jede Strecke eine abgestimmte Zuglänge festgelegt werden kann. Die Umsetzung der Maßnahmenart nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Zuglängen angepasst werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Anzahl der Wagen: „Bündelung von halblangen Zügen zu einem Zug“

1. Beschreibung

Bei der Bündelung von halblangen Zügen zu einem Zug sollten stets die Strecke und deren Infrastruktureinrichtungen im Blick gehalten werden. Damit kann eine Verringerung der Anzahl der Zugfahrten erreicht werden. Die maximale Zuglänge der Strecke sollte dabei möglichst komplett ausgenutzt werden. Damit wird sichergestellt, dass keine Kapazitäten der Infrastruktureinrichtungen (z. B. Ausnutzung der Länge von Überholgleisen) ungenutzt bleiben. Des Weiteren sollten Maßnahmenarten „minimale Länge des Zuges“ und „abgestimmte Länge des Zuges“ mit beachtet werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die Längen für die Bündelung für jede Strecke festgelegt und aus den Anmeldungen ein Fahrplan konstruiert werden. Zum anderen müssen die EVU ihre Transportketten entsprechend der Bündelungen gegebenenfalls anpassen.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

4. Nutzen

Wie oben erwähnt, werden zwei halblange Züge zu einem zusammengefasst. Dadurch reduzieren sich die Anzahl der Zugfahrten auf einer Strecke und demzufolge auch die Schallemissionen. Damit kann eine hohe dB(A)-Reduktion erreicht werden.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da für jede Strecke eine Bündelung von Zugfahrten erfolgen kann. Die Umsetzung der Maßnahmenart nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort eine Bündelung von Zugfahrten stattfinden kann.

6. Grobbewertung

<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
-	o	+	-	o	+	-	o	+	-	o	+			
Kosten			betriebliche Wirkung			Nutzen			Nutzen-Kosten-Verhältnis			Umsetzbarkeit		

Position: „Wagenarten bündeln“

1. Beschreibung

Die Reihenfolge der Wagen kann aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften (z. B. verkehrliches Ziel einzelner Wagen/Wagengruppen, Masse der Wagen, Art der Wagen) festgelegt werden. Das Ziel der speziellen Reihung der Wagen sollte zum einen auf dem wirtschaftlichen Optimum sowie zum anderen auf einer möglichst hohen Schallreduktion liegen. So kann z. B. ein niedrigeres Schallniveau erreicht werden, wenn besonders laute Wagen direkt hinter dem Triebfahrzeug angeordnet werden und danach leisere Wagen folgen. Ebenso kann es für das Beschleunigen und Bremsen sinnvoller sein, schwerere Wagen direkt hinter dem Triebfahrzeug anzuordnen und danach leichtere Wagen folgen zu lassen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als sehr hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die verfügbaren Wagen klassifiziert werden. Zum anderen müssen die Wagen bei der Zugbildung entsprechend gereiht werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da z. B. die Geschwindigkeit und die Länge des Wagenzuges beibehalten wird.

4. Nutzen

Obwohl, wie oben erwähnt, die Wagenarten entsprechend gebündelt werden, ist die zu erreichende dB(A)-Reduktion als gering einzuschätzen.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da zum einen die Wagenarten und zum anderen die Streckenklassen beachtet werden müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Züge angepasst werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Position: „Bremsarten bündeln“

1. Beschreibung

Die Reihenfolge der Wagen kann aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften (z. B. verkehrliches Ziel einzelner Wagen/Wagengruppen, Masse der Wagen, Art der Wagen) festgelegt werden. Das Ziel der speziellen Reihung der Wagen sollte zum einen auf dem wirtschaftlichen Optimum sowie zum anderen auf einer möglichst hohen Schallreduktion liegen. So kann z. B. ein niedrigeres Schallniveau erreicht werden, wenn Wagen mit besonders lauten und alten Bremsen direkt hinter dem Triebfahrzeug angeordnet werden und danach Wagen mit leisen und neuen Bremsen folgen. Ebenso kann es für das Beschleunigen und Bremsen sinnvoller sein, Wagen mit stärkerer Bremskraft direkt hinter dem Triebfahrzeug anzuordnen und danach Wagen mit geringerer Bremskraft folgen zu lassen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als sehr hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die verfügbaren Bremsarten klassifiziert werden. Zum anderen müssen die Bremsarten bei der Zugbildung entsprechend gereiht werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da z. B. die Geschwindigkeit und die Länge des Wagenzuges beibehalten werden.

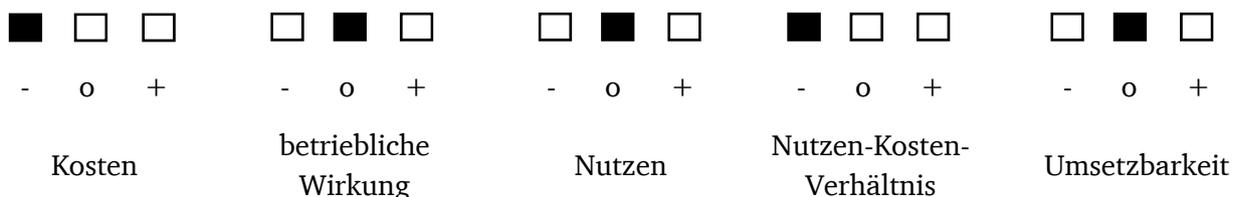
4. Nutzen

Obwohl, wie oben erwähnt, die Bremsarten entsprechend gebündelt werden, ist die zu erreichende dB(A)-Reduktion als gering einzuschätzen.

5. Umsetzbarkeit

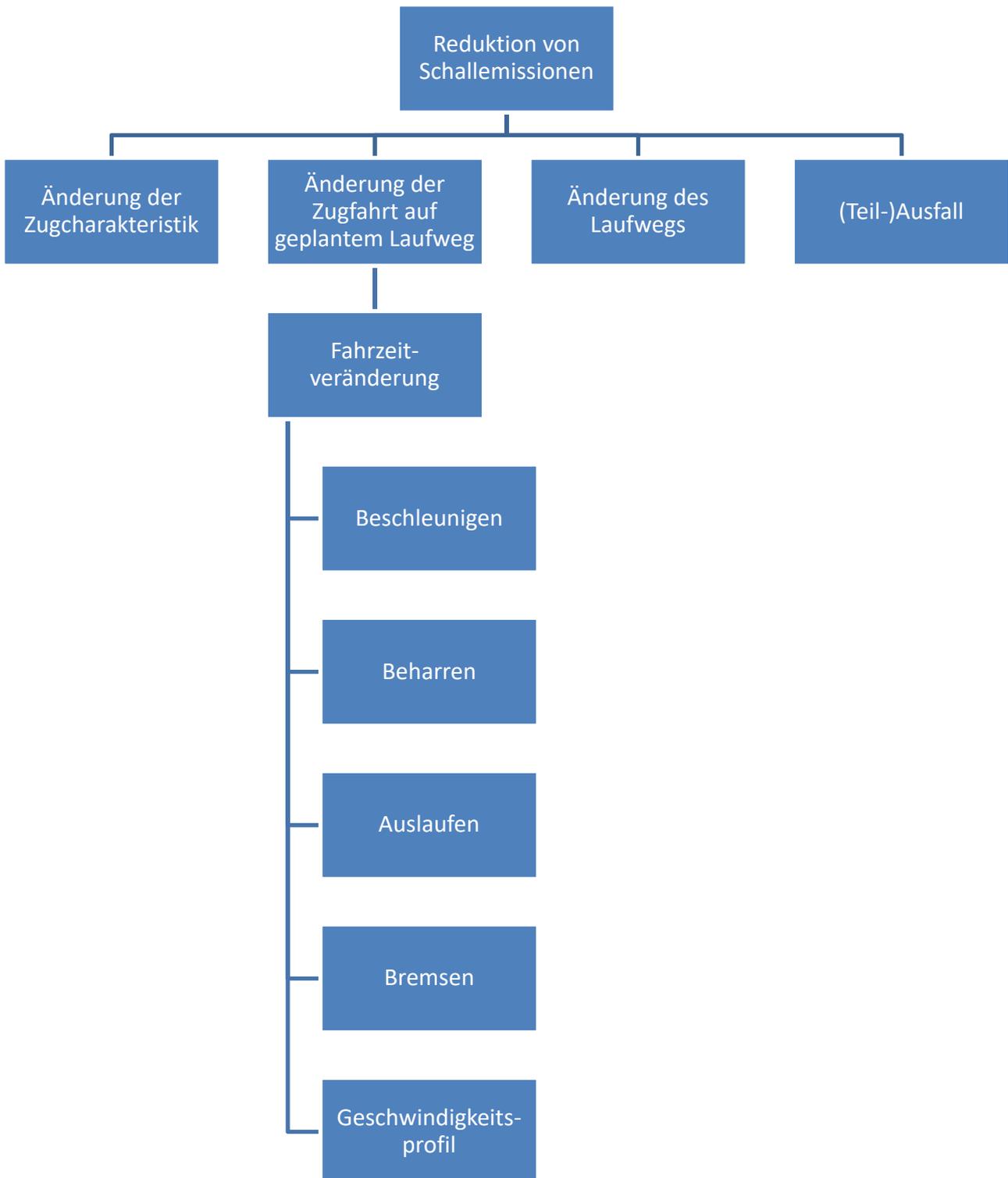
Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da zum einen die Bremsarten und zum anderen die Bremshundertstel beachtet werden müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Züge angepasst werden können.

6. Grobbewertung





Anlage 5: Steckbriefe: Fahrzeitveränderung



Beschleunigen: „geringere Beschleunigung“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Mit der Maßnahmenart „geringere Beschleunigung“ wird die Dauer der Beschleunigungsphase auf eine Zielgeschwindigkeit durch eine geringere Anfahrzugkraft verlängert. Damit wird eine Reduktion der Emission erreicht. Bei Einsatz der Maßnahmenart spielt es keine Rolle, ob der Zug bereits fährt und auf eine höhere Geschwindigkeit beschleunigt oder ob der Zug nach einem Halt langsamer anfährt. Für den optimalen Einsatzpunkt der Beschleunigungsphasen muss der Triebfahrzeugführer detaillierte Informationen erhalten, wann und wie stark beschleunigt werden soll.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen die Einsatzpunkte auf den Strecken festgelegt und die Übermittlung der Informationen an den Triebfahrzeugführer sichergestellt werden. Zum anderen müssen die längeren Beschleunigungsphasen in der Trassenplanung berücksichtigt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass durch die längeren Beschleunigungsphasen die Fahrzeit vergrößert und der betreffende Streckenabschnitt länger genutzt wird.

4. Nutzen

Aufgrund der Beschleunigung mit einer geringeren Anfahrzugkraft wird eine große dB(A)-Reduktion erreicht.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG eine geringere Beschleunigung möglich ist.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



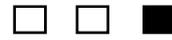
- o +

betriebliche
Wirkung



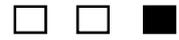
- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Beschleunigen: „geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Mit der Maßnahmenart „geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“ wird die Verkürzung der Dauer der Beschleunigungsphase erreicht, da die Höchstgeschwindigkeit verringert wird. Dadurch erreicht der Zug früher die Zielgeschwindigkeit und Schallemissionen werden vermieden. Demgegenüber steht eine längere Belegung des Streckenabschnitts.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen, da durch die Beschleunigung auf eine geringere Höchstgeschwindigkeit eine höhere Kapitalbindung der eingesetzten Fahrzeuge resultiert.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass durch die kürzere Beschleunigungsphase auf die verringerte Höchstgeschwindigkeit die Fahrzeit vergrößert und der betreffende Streckenabschnitt länger genutzt wird.

4. Nutzen

Aufgrund der kürzeren Beschleunigung und der verringerten Höchstgeschwindigkeit wird eine große dB(A)-Reduktion erreicht.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG eine kürzere Beschleunigung möglich ist.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



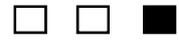
- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Beschleunigen: „Harmonisierung der Beschleunigungsphasen“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Mit der Maßnahmenart „Harmonisierung der Beschleunigungsphasen“ werden mehrere Züge behandelt. So sollen bestimmte Beschleunigungsphasen nur dann stattfinden, wenn dies der Betriebsablauf zulässt und damit eine Schallreduktion erreicht werden kann. Die Konzentration auf einen einzigen Zug ist hier nicht zielführend, da mehrere Züge betrachtet werden sollen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen mehrere Züge und deren momentane Geschwindigkeit gesteuert werden. Zum anderen müssen die Beschleunigungsphasen abgestimmt und die Fahrempfehlungen an die Triebfahrzeugführer gesandt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da durch deren Anwendung weder weniger noch mehr Züge fahren können.

4. Nutzen

Durch die Harmonisierung der Beschleunigungsphasen wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht, da weder weniger noch mehr Züge fahren können.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da mindestens zwei Züge vorhanden sein müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Beschleunigungsphasen harmonisiert werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Beharren: „Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

In der Regel wird ein Zug auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit beschleunigt und hält diese über einen längeren Zeitraum. Dies ist nicht immer der Fall. Sollte die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht gefahren werden, wird das Schallereignis verlängert. Die betroffenen Personen sind also länger den Emissionen ausgesetzt. Diese Zeit kann verringert werden, indem die zulässige Höchstgeschwindigkeit gefahren wird. Dadurch kann u. U. auch die Leistungsfähigkeit der Strecke steigen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen die Triebfahrzeugführer eine entsprechende Anweisung erhalten. Zum anderen müssen die Fahrpläne so gestaltet werden, dass ein Fahren der zulässigen Höchstgeschwindigkeit möglich ist.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass durch das Fahren der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die Fahrzeit verringert und der betreffende Streckenabschnitt kürzer genutzt wird.

4. Nutzen

Der Nutzen wird neutral bewertet, da gemäß Schall 03 immer die Streckengeschwindigkeit, auch bei langsamer verkehrenden Zügen, anzusetzen ist.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG eine zulässige Höchstgeschwindigkeit festgelegt ist.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



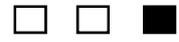
- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Beharren: „geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Die Schallemissionen während der Beharrungsphase können verringert werden, wenn eine niedrigere Höchstgeschwindigkeit gefahren wird. Dadurch erreicht der Zug früher die Zielgeschwindigkeit und Schallemissionen werden vermieden. Mit einer Anzeige im Fahrzeug kann dem Triebfahrzeugführer eine Fahrempfehlung (z. B. „Geschwindigkeit halten“) gegeben werden. Dadurch werden zum einen die Emissionen reduziert, da mit einer geringeren Leistung gefahren wird, und zum anderen der Energieverbrauch gesenkt. Demgegenüber steht eine längere Belegung des Streckenabschnitts, was zu einer Einschränkung der Leistungsfähigkeit führen kann.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen die verringerten Höchstgeschwindigkeiten auf den Strecken festgelegt werden. Zum anderen müssen die kürzeren Beharrungsphasen in der Trassenplanung berücksichtigt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass durch die verringerte Höchstgeschwindigkeit die Fahrzeit vergrößert und der betreffende Streckenabschnitt länger genutzt wird.

4. Nutzen

Aufgrund der kürzeren Beharrungsphase und der verringerten Höchstgeschwindigkeit wird eine große dB(A)-Reduktion erreicht. Die Reduktion fällt umso höher aus, desto größer die Reduzierung der Geschwindigkeit ist.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG eine geringere Höchstgeschwindigkeit möglich ist.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



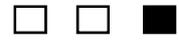
- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Beharren: „Harmonisierung der Beharrungsphasen“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Mit der Maßnahmenart „Harmonisierung der Beharrungsphasen“ werden mehrere Züge behandelt. So sollen die Beharrungsfahrten nur dann stattfinden, wenn dies der Betriebsablauf zulässt und damit eine Schallreduktion erreicht werden kann. Die Konzentration auf einen einzigen Zug ist hier nicht zielführend, da mehrere Züge betrachtet werden sollen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen mehrere Züge und deren momentane Geschwindigkeit gesteuert werden. Zum anderen müssen die Beharrungsphasen abgestimmt und die Fahrempfehlungen an die Triebfahrzeugführer gesandt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da durch deren Anwendung weder weniger noch mehr Züge fahren können.

4. Nutzen

Durch die Harmonisierung der Beschleunigungsphasen wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht, da weder weniger noch mehr Züge fahren können.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da mindestens zwei Züge vorhanden sein müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Beharrungsphasen harmonisiert werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Auslaufen: „Auslaufen nutzen“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Bisher wird die Phase des Auslaufens während einer Zugfahrt kaum genutzt. Dabei ist sie sehr einfach umzusetzen: der Zug rollt ohne Einsatz des Motors durch z. B. eine Ortslage hindurch. Dies verhindert zum einen, dass die Emission des Motors innerhalb der Ortslage generiert wird, zum anderen rollt der Zug mit einer abnehmenden und damit geringeren Geschwindigkeit durch die Ortslage, was zu einer Schallreduktion beiträgt. Für den optimalen Einsatzpunkt des Auslaufens muss der Triebfahrzeugführer detaillierte Informationen erhalten, wann ausgerollt werden soll.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen die Einsatzpunkte des Auslaufens festgelegt werden. Zum anderen muss eine Kommunikation an die Triebfahrzeugführer erfolgen.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da nur auf einem relativ kurzen Stück ausgelassen wird.

4. Nutzen

Durch die Nutzung der Auslaufphasen wird eine große dB(A)-Reduktion erreicht. Dies liegt darin begründet, dass der Motor abgeschaltet wird und der Zug mit einer abnehmenden Geschwindigkeit durch z. B. eine Ortslage hindurchrollt.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG das Auslaufen möglich ist.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



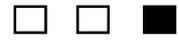
- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Auslaufen: „Harmonisierung der Auslaufphasen“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Mit der Maßnahmenart „Harmonisierung der Auslaufphasen“ werden mehrere Züge behandelt. So soll das Auslaufen nur dann stattfinden, wenn dies der Betriebsablauf zulässt und damit eine Schallreduktion erreicht werden kann. Die Konzentration auf einen einzigen Zug ist hier nicht zielführend, da mehrere Züge betrachtet werden sollen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen mehrere Züge und deren momentane Geschwindigkeit gesteuert werden. Zum anderen müssen die Auslaufphasen abgestimmt und die Fahrempfehlungen an die Triebfahrzeugführer gesandt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da durch deren Anwendung weder weniger noch mehr Züge fahren können.

4. Nutzen

Durch die Harmonisierung der Beschleunigungsphasen wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht, da weder weniger noch mehr Züge fahren können.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da mindestens zwei Züge vorhanden sein müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Auslaufphasen harmonisiert werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Bremsen: „geringere Beschleunigung“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Mit der Maßnahmenart „geringere Beschleunigung“ wird die Dauer der Bremsphase auf eine Zielgeschwindigkeit durch eine geringere Bremskraft verlängert, gleichzeitig wird damit eine Schallreduktion erreicht. Die verlängerte Bremsphase kann für einen bestimmten Abschnitt einer Strecke (z. B. in einer Ortslage) gelten. Damit wird eine Reduktion der Emission erreicht und diese in das Gebiet außerhalb der Ortslage verschoben. Bei Einsatz der Maßnahmenart spielt es eine Rolle, aus welcher Geschwindigkeit der Zug bremst, da mit zunehmender Geschwindigkeit andere Schallquellen dominanter werden. Für den optimalen Einsatzpunkt der Bremsung muss der Triebfahrzeugführer detaillierte Informationen erhalten, wann und wie stark gebremst werden soll. Der Einsatzpunkt hängt dabei von diversen Einflussgrößen ab. Zur Anzeige der Informationen sind entweder digitale Hinweise im Fahrzeug oder analoge Hinweise mittels Signalen/Schildern an der Strecke (z. B. Nutzung von bestehenden Infrastruktureinrichtungen) denkbar.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen die Einsatzpunkte auf den Strecken festgelegt und die Übermittlung der Informationen an den Triebfahrzeugführer sichergestellt werden. Zum anderen müssen die längeren Bremsphasen in der Trassenplanung berücksichtigt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass sich durch die längere Bremsphase die Fahrzeit vergrößert und der betreffende Streckenabschnitt länger genutzt wird. Das hat zur Folge, dass die Kapazität verringert wird.

4. Nutzen

Es wird angenommen, dass aufgrund der Beschleunigung mit einer geringeren Bremskraft eine große dB(A)-Reduktion erreicht wird. Dies ist allerdings mit der aktuellen Berechnungsvorschrift nach Schall 03 nicht nachweisbar.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG eine geringere Beschleunigung möglich ist.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



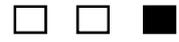
- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Bremsen: „Harmonisierung der Bremsphasen“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Mit der Maßnahmenart „Harmonisierung der Bremsphasen“ werden mehrere Züge behandelt. So soll das Bremsen nur dann stattfinden, wenn dies der Betriebsablauf zulässt und damit eine Schallreduktion erreicht werden kann. Die Konzentration auf einen einzigen Zug ist hier nicht zielführend, da mehrere Züge betrachtet werden sollen.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen mehrere Züge und deren momentane Geschwindigkeit gesteuert werden. Zum anderen müssen die Bremsphasen abgestimmt und die Fahrempfehlungen an die Triebfahrzeugführer gesandt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da durch deren Anwendung weder weniger noch mehr Züge fahren können.

4. Nutzen

Durch die Harmonisierung der Beschleunigungsphasen wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht, da weder weniger noch mehr Züge fahren können.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da mindestens zwei Züge vorhanden sein müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Bremsphasen harmonisiert werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Halt: „Harmonisierung der Halte“

1. Beschreibung

Die Veränderung der Fahrzeit eines Zuges kann in mehreren Fahrzuständen einer Zugfahrt stattfinden. Dies wird durch eine Variation der Geschwindigkeit erreicht, da die Zugfahrt auf dem geplanten Laufweg stattfindet. Die betriebliche Anweisung zur Geschwindigkeitsveränderung kann an festen Punkten auf einer Strecke erfolgen. Die Veränderung kann durch Erhöhung oder Verringerung erfolgen.

Eine Verringerung hat zur Folge, dass ein Zug langsamer fährt und somit eine geringere Schallemission aufweist. Durch die verringerte Geschwindigkeit wird die Emission über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Des Weiteren wird durch eine Verringerung der Streckenabschnitt länger belegt.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Schallemission. Dies kann durch die kürzere Einwirkzeit der Emission (siehe Verringerung der Geschwindigkeit) teilweise oder ganz kompensiert werden. Des Weiteren wird bei einer Erhöhung die Leistungsfähigkeit mindestens beibehalten, wenn nicht sogar erhöht. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Da bisher bei allen Fahrzuständen einer Zugfahrt eine Harmonisierung von mehreren Zügen vorgesehen ist, ist es sinnvoll, diese auch bei den Halten vorzusehen. Die Halte können zur Synchronisation der Züge genutzt werden, da nicht gewährleistet werden kann, dass die Harmonisierung bei allen Zügen exakt parallel abläuft (unterschiedliche Baureihen, verschiedene Triebfahrzeugführer, verschiedene Massen der Züge, etc.). Eine Harmonisierung der Halte würde dieses Problem beheben.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel einzuschätzen. Zum einen müssen mehrere Züge und deren momentane Position gesteuert werden. Zum anderen müssen die Halte abgestimmt und die Fahrempfehlungen an die Triebfahrzeugführer gesandt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da durch deren Anwendung weder weniger noch mehr Züge fahren können.

4. Nutzen

Durch die Harmonisierung der Beschleunigungsphasen wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht, da weder weniger noch mehr Züge fahren können.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da mindestens zwei Züge vorhanden sein müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da nicht sofort alle Ausfahrtsignale harmonisiert werden können.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Geschwindigkeitsprofil: „schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren“

1. Beschreibung

Ein schallarmes Geschwindigkeitsprofil kann mit Hilfe des Verzeichnisses der örtlich zugelassenen Geschwindigkeiten (VzG) auf einer Strecke konstruiert werden. Hier ist eine Erhöhung, Verringerung oder eine Kombination (z. B. Mittelwertbildung) für die verschiedenen Geschwindigkeiten denkbar. Welche Verzeichnisse angepasst werden und wie hoch die Deltas zu den Ausgangsgeschwindigkeiten sind, ist entsprechend festzulegen. Eine so optimierte Abfolge der Verzeichnisse ermöglicht einen flüssigeren und damit schallärmeren Betriebsablauf.

Die Geschwindigkeiten von mehreren Zügen können auch insgesamt verstetigt werden. Dabei kann ebenso eine Erhöhung, Verringerung oder eine Kombination (z. B. Mittelwert) gewählt werden. Damit können z. B. die Anzahl von Beschleunigungs- und Bremsphasen aufgrund langsamerer oder schnellerer Züge minimiert werden. Dies hat einen positiven Effekt auf den Energieverbrauch. Es werden also die Anteile Beharren und Auslaufen einer Zugfahrt erhöht. Für welches Gebiet diese Verstetigung gilt und welche Deltas zu den Ausgangsgeschwindigkeiten erreicht werden sollen, ist für den jeweiligen Streckenabschnitt festzulegen. Die Verstetigung wirkt sich auf die Mindestzugfolgezeiten zwischen den einzelnen Zügen aus, welche wiederum die Leistungsfähigkeit der Streckenabschnitte beeinflusst. Folgende Geschwindigkeitsszenarien sind für einen bestimmten Streckenabschnitt denkbar:

- Verringerung der Geschwindigkeit von schnellen Zügen
- Erhöhung der Geschwindigkeit von langsamen Zügen
- Bildung eines Mittelwerts, der sowohl eine Erhöhung als auch eine Verringerung der Geschwindigkeiten berücksichtigt

Somit kann für einen bestimmten Streckenabschnitt der Mittelungspegel gesenkt und die Stärke der Pegelspitzen reduziert werden.

Neben der Verstetigung der Geschwindigkeiten können auch die Verkehre selbst homogenisiert werden. Dazu wird auf einem bestimmten Streckenabschnitt die Zugreihenfolge geändert. Aus der Zugreihenfolge „schnell – langsam – schnell“ ließen sich beispielsweise folgende zwei Kombinationen bilden:

- schnell – schnell – langsam
- langsam – schnell – schnell

Damit werden zum einen die Brems- und Beschleunigungsphasen reduziert und zum anderen die Leistungsfähigkeit des Streckenabschnitts erhöht. Die Homogenisierung kann dabei in Verbindung mit der Verstetigung der Geschwindigkeit angewendet werden. Somit fahren z. B. erst die schnelleren Züge und danach die langsameren. Denkbar wäre auch, dass schon bei der Trassenplanung bestimmte Zugreihenfolgen priorisiert oder im Rahmen der Systemtrassen angeboten werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die Verzeichnisse der zulässigen Geschwindigkeiten festgelegt und angepasst werden. Zum anderen müssen die veränderten Fahr- und Belegungszeiten in der Trassenplanung berücksichtigt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart wird eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten erreicht und somit der Betrieb insgesamt verflüssigt. Dadurch wird die Kapazität erhöht.

4. Nutzen

Aufgrund der Harmonisierung der Geschwindigkeiten und der Verflüssigung des Betriebes wird eine große dB(A)-Reduktion erreicht.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG Verzeichnisse der örtlich zugelassenen Geschwindigkeiten existieren. Demgegenüber nimmt die Umsetzung einige Zeit in Anspruch.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Geschwindigkeitsprofil: „Weiterentwicklung der Zuglaufregelung“

1. Beschreibung

Die bisherige Zuglaufregelung und deren Fahrempfehlungen werden allein auf der Grundlage des aktuellen Betriebsablaufs getroffen. Damit soll ein Optimum der Kapazität für einen bestimmten Abschnitt und eine Energiereduzierung erreicht werden. Die Weiterentwicklung der Zuglaufregelung zielt darauf ab, auch die Reduktion des Schalls bei der Entscheidungsfindung miteinzubeziehen. Damit werden gleichzeitig eine Energieeinsparung und eine Schallreduktion erreicht. Welche Gewichtung die Reduzierung des Energieverbrauchs und die Schallreduktion jeweils besitzen, muss festgelegt werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die Algorithmen zur Berechnung der Fahrempfehlung sowohl die Kapazitätsoptimierung als auch die Schallreduktion abdecken. Dies könnte bei mehr als zwei beteiligten Zügen zu Problemen führen. Zum anderen darf die Ermittlung und Übertragung des Ergebnisses nicht viel Zeit in Anspruch nehmen, da die Maßnahmenart in der Durchführung (Betrieb) eingesetzt wird.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass ein Optimum zwischen Kapazität und Schallreduktion erreicht wird. So werden z. B. Beschleunigungs- und Bremsphasen reduziert und so der Betrieb verflüssigt.

4. Nutzen

Der Nutzen der Maßnahmenart ist als hoch einzuschätzen, da neben der Kapazitätsoptimierung auch eine möglichst hohe Schallreduktion erreicht werden soll. Dies wird u. a. durch die Verringerung der Beschleunigungs- und Bremsphasen möglich.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da die Signale entsprechend angesteuert werden müssen. Ist dies nicht gegeben, ergibt sich eine lange Dauer bis zur Umsetzung.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

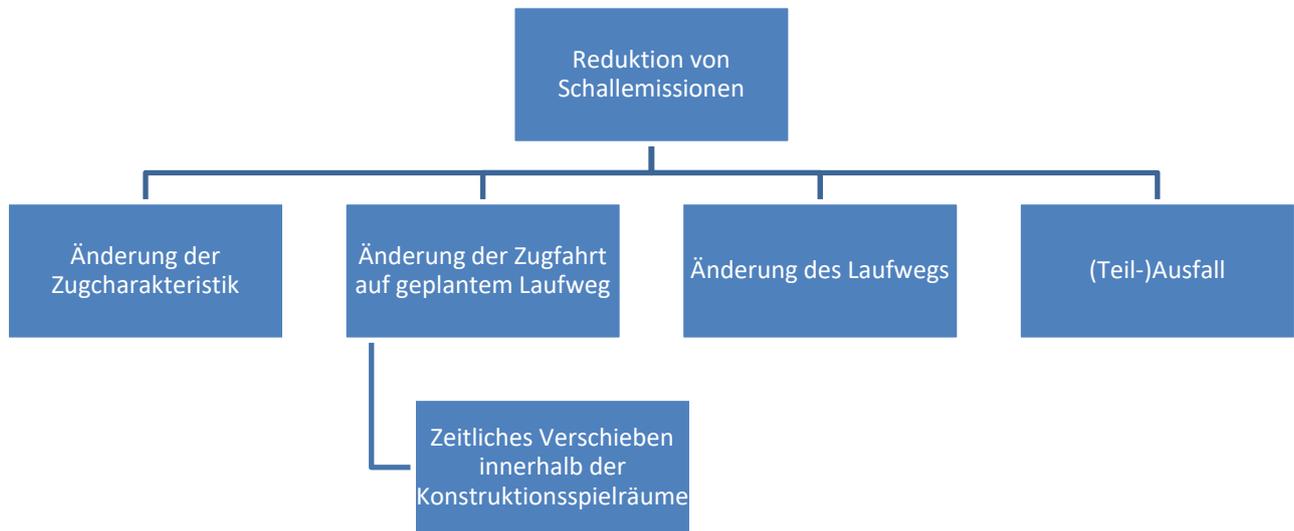
Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Anlage 6: Steckbrief: Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktionsspielräume



„Konstruktion Schienengüterverkehr ohne Überholung“

1. Beschreibung

Bei dem Einsatz der Maßnahmenarten zur Fahrzeitveränderung wird die Trasse eines Zuges nicht zeitlich verschoben. Dies kann aufgrund von Konflikten im Rahmen der Trassenanmeldung notwendig sein. Dazu sehen die Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG zwei Möglichkeiten vor:

- Erstellung eines Trassenangebots unter Nutzung der Konstruktionsspielräume ohne Rücksprache mit dem Antragsteller
 - Schienenpersonenverkehr: +/- 3 Minuten
 - Übrige Zugtrassen (z. B. Güterzüge, Triebfahrzeugfahrten): +/- 30 Minuten
- Erstellung eines Trassenangebots unter Erweiterung der o. g. Konstruktionsspielräume mit Rücksprache mit dem Antragsteller (sogenanntes Koordinierungsverfahren)

Dabei spielt es keine Rolle, wie der Konflikt gelöst wurde. Das Ergebnis ist in jedem Fall eine neue Trasse des Zuges. Bei der Konstruktion dieser Trasse sollen Güterzüge ohne Überholung konstruiert werden. Dadurch entfallen z. B. Beschleunigungs- und Bremsphasen der Güterzüge. Auf diese neu konstruierte Trasse lassen sich ebenso die Maßnahmenarten zur Fahrzeitveränderung einsetzen. Ebenfalls ist eine Vielzahl von Ausprägungen der verschiedenen Dimensionen möglich.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die Trassen entsprechend neu konstruiert werden. Zum anderen müssten gegebenenfalls diese aufgrund weiterer Konflikte mit den Maßnahmenarten zur Fahrzeitveränderung angepasst werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass durch die Konstruktion der Güterzüge ohne Überholung Beschleunigungs- und Bremsphasen entfallen, die Durchschnittsgeschwindigkeit steigt und die Fahrzeit verkürzt wird. Das hat zur Folge, dass die Kapazität erhöht wird.

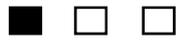
4. Nutzen

Durch die Konstruktion der Güterzüge ohne Überholung wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da mindestens zwei Züge vorhanden sein müssen. Auch nimmt die Umsetzung der Maßnahmenart eine gewisse Zeit in Anspruch, da die Trassen entsprechend konstruiert werden müssen.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



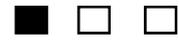
- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis

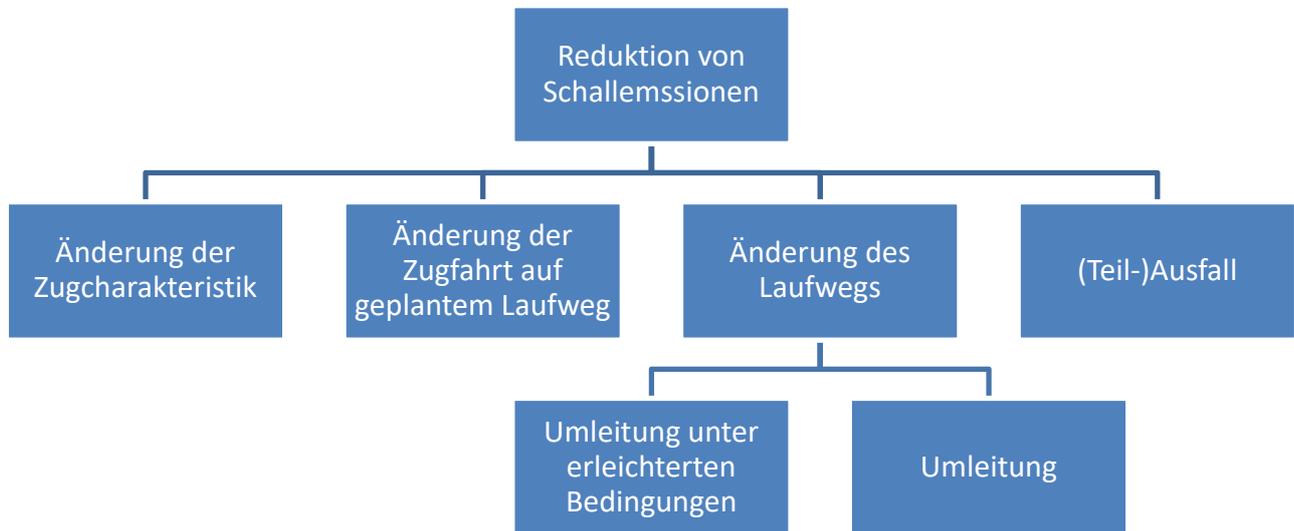


- o +

Umsetzbarkeit



Anlage 7: Steckbriefe: Änderung des Laufwegs



„Parallelfahrten zulassen“

1. Beschreibung

Neben den Maßnahmenarten zur zeitlichen Verschiebung einer Trasse und der damit verbundenen Konfliktlösung, kann auch eine räumliche Verschiebung zur Lösung eines Konflikts führen. Die Änderung des Laufwegs einer Zugfahrt kann in die Unterthemen „Umleitung unter erleichterten Bedingungen“ und „Umleitung“ unterteilt werden. Da für beide Unterthemen dieselben Maßnahmenarten erarbeitet wurden, werden diese gemeinsam beschrieben. Diese beziehen sich dabei auf mehrere Züge.

Es ist zwischen der Entlastung und der neuen Belastung durch den verlagerten Verkehr abzuwägen.

Eine Parallelfahrt von zwei Zügen soll die Emissionen von Zügen bündeln. Eine Strecke, die mit entsprechender Signalisierung zum Befahren des Gegengleises ausgestattet ist, kann z. B. für jeweils acht Stunden in nördlicher bzw. südlicher Richtung (bei einer Streckenöffnungszeit von 16 Stunden täglich) befahren werden. Das Betriebsprogramm muss entsprechend geplant und angepasst werden. Somit wird die Anzahl der Schallemissionen reduziert und der Schallpegel geringfügig angehoben.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als hoch einzuschätzen. Zum einen muss das Betriebsprogramm entsprechend geplant und angepasst werden. Zum anderen müssen gegebenenfalls weitere Strecken mit Signalen für eine Parallelfahrt ausgerüstet werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt, da durch deren Anwendung weder weniger noch mehr Züge fahren können.

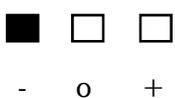
4. Nutzen

Durch die Parallelfahrten wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht.

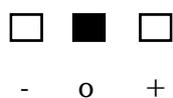
5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da nicht im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG Parallelfahrten durchgeführt werden können. Die Umsetzung nimmt viel Zeit in Anspruch, da Strecken, auf denen keine Parallelfahrten möglich sind, erst dafür ausgestattet werden müssen.

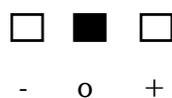
6. Grobbewertung



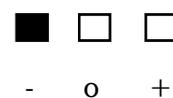
Kosten



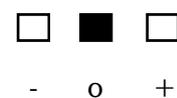
betriebliche
Wirkung



Nutzen



Nutzen-Kosten-
Verhältnis



Umsetzbarkeit

„Umfahren von Lärmhotspots“

1. Beschreibung

Neben den Maßnahmenarten zur zeitlichen Verschiebung einer Trasse und der damit verbundenen Konfliktlösung, kann auch eine räumliche Verschiebung zur Lösung eines Konflikts führen. Die Änderung des Laufwegs einer Zugfahrt kann in die Unterthemen „Umleitung unter erleichterten Bedingungen“ und „Umleitung“ unterteilt werden. Da für beide Unterthemen dieselben Maßnahmenarten erarbeitet wurden, werden diese gemeinsam beschrieben. Diese beziehen sich dabei auf mehrere Züge.

Es ist zwischen der Entlastung und der neuen Belastung durch den verlagerten Verkehr abzuwägen.

Die Einrichtung von sogenannten „Schallregionen“ und „Ruheregionen“ soll Regionen festlegen, in denen entweder viel Verkehr und damit ein hoher Schallpegel oder wenig Verkehr und damit ein geringer Schallpegel herrscht.

Eine Verknüpfung zur örtlichen und zeitlichen Komponente ist sehr sinnvoll.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die Regionen entsprechend festgelegt werden. Zum anderen müssen darauf aufbauend Anpassungen in der Trassenplanung berücksichtigt werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

4. Nutzen

Durch die Festlegung von Schall- und Ruheregionen wird insgesamt eine hohe dB(A)-Reduktion erreicht. Dabei reduziert sich die Schallbelastung in den Ruheregionen deutlich, da dort wenig bis gar nicht mehr gefahren wird. Demgegenüber erhöht sich die Schallbelastung in den Schallregionen, da dort entsprechend mehr gefahren wird. Da dort vor der Verlagerung schon ein hohes Schallniveau herrschte, wird der Schallpegel durch die Verlagerung gering angehoben.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da die entsprechenden Gebiete und Strecken vorhanden sein müssen, um die Regionen einzurichten. Die Umsetzung nimmt sehr viel Zeit in Anspruch, da die Regionen eingerichtet werden müssen.

6. Grobbewertung



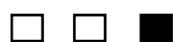
- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

„Bauarbeiten, Betriebsstörungen oder Schallemissionen berücksichtigen“

1. Beschreibung

Neben den Maßnahmenarten zur zeitlichen Verschiebung einer Trasse und der damit verbundenen Konfliktlösung, kann auch eine räumliche Verschiebung zur Lösung eines Konflikts führen. Die Änderung des Laufwegs einer Zugfahrt kann in die Unterthemen „Umleitung unter erleichterten Bedingungen“ und „Umleitung“ unterteilt werden. Da für beide Unterthemen dieselben Maßnahmenarten erarbeitet wurden, werden diese gemeinsam beschrieben. Diese beziehen sich dabei auf mehrere Züge.

Es ist zwischen der Entlastung und der neuen Belastung durch den verlagerten Verkehr abzuwägen.

Im Rahmen der bisherigen Baubetriebsplanung wird die Integrierte Bündelung für Baustellen angewendet. Damit werden verschiedene Baustellen auf einem Streckenabschnitt so aufeinander abgestimmt, dass der Zugverkehr auf dem Abschnitt möglichst wenig beeinträchtigt wird. Da Baustellen unter anderem Schallemissionen erzeugen und diese oftmals störender wirken als Zugfahrten, ist eine Kombination von Baustellen und Zugfahrten durchaus sinnvoll. Inwieweit ein gleichzeitiges Fahren und Bauen möglich ist, muss von Strecke zu Strecke geprüft werden.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die Baustellen im Netz aufeinander abgestimmt werden. Zum anderen muss die Trassenplanung für das gleichzeitige Fahren und Bauen angepasst werden.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

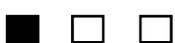
4. Nutzen

Durch das gleichzeitige Fahren und Bauen wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da im gesamten Netz der Deutschen Bahn AG die Baustellen aufeinander abgestimmt werden können. Die Abstimmung und die Anpassung in der Trassenplanung nehmen viel Zeit in Anspruch, sodass die Umsetzung entsprechend lange dauert.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

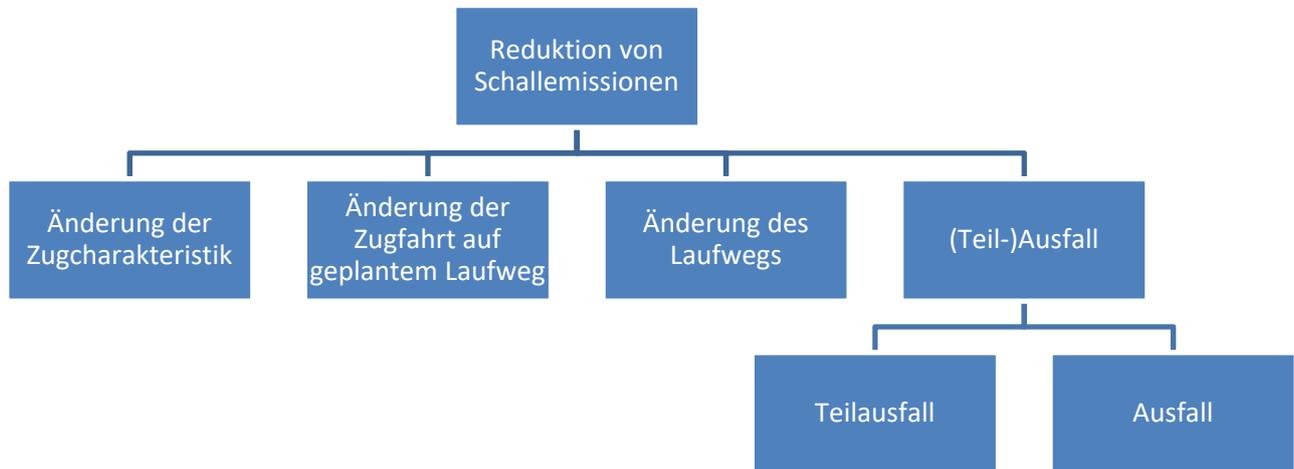
Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

Anlage 8: Steckbriefe: (Teil-)Ausfall



„Leerfahrten vermeiden“

1. Beschreibung

Neben den Maßnahmenarten zur zeitlichen und/oder räumlichen Verschiebung einer Trasse und der damit verbundenen Konfliktlösung, kann auch ein Teilausfall oder Ausfall zur Lösung eines Konflikts führen. Da für die beiden Unterthemen Teilausfall und Ausfall dieselben Maßnahmenarten erarbeitet wurden, werden diese gemeinsam beschrieben. Diese beziehen sich dabei auf mehrere Züge.

Bisher wird die Transportkapazität der Züge nicht überall ausgelastet. Dies liegt zum einen daran, dass die zur Verfügung stehende Zuglänge nicht komplett ausgenutzt wird und zum anderen daran, dass in einem Zug Leerwagen verkehren. Durch eine Vermeidung von Leerfahrten können Schallemissionen und Energieverbräuche reduziert werden, da weniger Wagen in einem Zug verkehren.

Wenn die Leerfahrten vermieden werden können, können die freigewordenen Kapazitäten durch beladene Wagen genutzt werden. Dadurch würde sich die Auslastung der Züge erhöhen. In einem nächsten Schritt könnten so aus 3 Zügen 2 gebildet werden und dadurch die Anzahl der Zugfahrten reduziert werden, was ebenfalls zu einer Schallreduktion beiträgt.

Die geringere Zugzahl kann z. B. für Pausen in der Nacht genutzt werden. Ebenfalls ist eine Kombination mit weiteren Maßnahmenarten (s. o.) und die Verbindung mit den genannten Dimensionen sinnvoll. Nicht zu vernachlässigen ist der relativ hohe planerische Aufwand für die Zugzusammenstellung.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die freien Kapazitäten in den Zugfahrten ermittelt werden. Zum anderen besteht ein relativer hoher planerischer Aufwand für die Zugzusammenstellung.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität eine mittlere Änderung erfährt.

4. Nutzen

Durch die Verhinderung von Leerfahrten wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da eine entsprechende Anzahl von Wagen und freie Kapazitäten vorhanden sein müssen. Die Umsetzung nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da die Zugzusammenstellung entsprechend geplant werden muss.

6. Grobbewertung



- o +

Kosten



- o +

betriebliche
Wirkung



- o +

Nutzen



- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis



- o +

Umsetzbarkeit

„Züge abschnittsweise kuppeln“

1. Beschreibung

Neben den Maßnahmenarten zur zeitlichen und/oder räumlichen Verschiebung einer Trasse und der damit verbundenen Konfliktlösung, kann auch ein Teilausfall oder Ausfall zur Lösung eines Konflikts führen. Da für die beiden Unterthemen Teilausfall und Ausfall dieselben Maßnahmenarten erarbeitet wurden, werden diese gemeinsam beschrieben. Diese beziehen sich dabei auf mehrere Züge.

Eine weitere Maßnahmenart zur Reduktion der Schallemissionen bei gleichzeitiger Erhöhung des Auslastungsgrades ist die abschnittsweise Kupplung von Zügen. Oftmals wird die maximal mögliche Zuglänge auf einer Strecke nicht ausgenutzt. Eine abschnittsweise Kupplung von z. B. zwei kurzen Zügen zu einem langen, könnte dies beheben. Dadurch würden weniger Zugfahrten stattfinden und eine Verbesserung der Schallemissionen erreicht werden. Des Weiteren könnten Kapazitäten in der Trassenvergabe entstehen, die z. B. für Pausen in der Nacht genutzt werden könnten. Des Weiteren sind eine Kombination mit anderen Maßnahmenarten und die Verbindung mit den Dimensionen sinnvoll. Nicht zu vernachlässigen ist der relativ hohe Aufwand für das Kuppeln der Züge.

2. Kosten

Die Kosten für den Einsatz dieser Maßnahmenart sind als mittel bis hoch einzuschätzen. Zum einen müssen die freien Kapazitäten in den Zugfahrten ermittelt werden. Zum anderen besteht ein relativer hoher Aufwand beim Kuppeln der Züge.

3. Betriebliche Wirkung

Bei Einsatz der Maßnahmenart ist davon auszugehen, dass die Kapazität keine große Änderung erfährt.

4. Nutzen

Durch das abschnittsweise Kuppeln von Zügen wird eine geringe dB(A)-Reduktion erreicht.

5. Umsetzbarkeit

Die Maßnahmenart ist nicht uneingeschränkt ein- und umsetzbar, da nicht auf allen Strecken entsprechend lange Züge verkehren dürfen. Auch müssen eine entsprechende Anzahl von Wagen und freie Kapazitäten vorhanden sein. Die Umsetzung nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch, da das Kuppeln sehr aufwendig ist.

6. Grobbewertung

- o +

Kosten

- o +

betriebliche
Wirkung

- o +

Nutzen

- o +

Nutzen-Kosten-
Verhältnis

- o +

Umsetzbarkeit



Anlage 9: Grobbewertung der Maßnahmenarten

Oberpunkt	Unterpunkt	Maßnahmenart	Kosten	betriebl. Wirkung	Nutzen	N-K-Verhältnis	Umsetzbarkeit	Ergebnis	
Änderung des Triebfahrzeug	Art	mehr E-Traktion statt V-Traktion	-	o	o	-	-	-	
		einzelne Schallquellen am Fahrzeug zeitweise eliminieren	o	o	o	o	o	o	
		Zweikraftlok: E-Lok oder Brennstoffzelle zusätzlich	-	o	+	o	o	o	o
	Anzahl	weniger Triebfahrzeuge durch mehr Leistung pro Triebfahrzeug	o	o	o	o	o	o	o
		Position	Zugspitze und Zugende/Zugspitze und Zugmitte/Doppeltraktion	o	o	o	o	-	o
			nur leise und neue Wagen und keine lauten und alten Wagen	-	o	o	o	-	o
Änderung des Wagenzuges	Art der Wagen	nur leise und neue Bremsen und keine lauten und alten Bremsen	o	o	+	+	o	+	
		Kombination aus leisen und lauten Wagen	o	o	o	o	o	o	
		minimale Länge des Zuges	o	o	o	o	o	o	o
	Anzahl der Wagen	abgestimmte Länge des Zuges	o	o	o	o	o	o	o
		Bündelung von halblangen Zügen zu einem Zug	o	o	o	o	o	-	o
		Position	Wagenarten bündeln: z. B. vorne laut/hinten leise	-	o	o	o	-	o
Bremsarten bündeln: z. B. vorne laut/hinten leise	-		o	o	o	-	o	-	

Oberpunkt	Unterpunkt	Maßnahmenart	Kosten	betriebl. Wirkung	Nutzen	N-K-Verhältnis	Umsetzbarkeit	Ergebnis	
Fahrzeitveränderung	Beschleunigen	geringere Beschleunigung	o	-	+	+	+	+	
		geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})	o	-	+	+	+	+	
	Beharren	Harmonisierung der Beschleunigungsphasen	o	o	o	o	o	-	o
		Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) ausnutzen	o	+	o	o	+	+	+
		geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max})	o	-	+	+	+	+	+
		Harmonisierung der Beharrungsphasen	o	o	o	o	o	-	o
	Auslaufen	Auslaufen nutzen	o	o	+	+	+	+	+
		Harmonisierung der Auslaufphasen	o	o	o	o	o	-	o
	Bremsen	geringere Beschleunigung	o	-	+	+	+	+	+
		Harmonisierung der Bremsphasen	o	o	o	o	o	-	o
	Halt	Harmonisierung der Halte	o	o	o	o	o	-	o

Oberpunkt	Unterpunkt	Maßnahmenart	Kosten	betriebl. Wirkung	Nutzen	N-K-Verhältnis	Umsetzbarkeit	Ergebnis
Fahrzeitveränderung	Geschwindigkeitsprofil	schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)	0	0	+	+	0	+
		Weiterentwicklung der Zuglaufregelung	0	+	+	+	-	+
Zeitliches Verschieben innerhalb der Konstruktions-spielräume	-	Konstruktion Schienengüterverkehr ohne Überholungen	-	+	0	-	-	-
		Parallelfahrten zulassen	-	0	0	-	0	-
Umleitung unter erleichterten Bedingungen/Umleitung	-	Umfahren von Lärmhotspots	0	0	+	+	-	+
		Bauarbeiten, Betriebsstörungen oder Schallemissionen berücksichtigen	-	0	0	-	-	-
Teilausfall/Ausfall	-	Leerfahrten vermeiden	0	0	0	0	0	0
		Züge abschnittsweise kuppeln	0	0	0	0	-	0



Anlage 10: Mittlere Mindestzugfolgezeiten, mittlere Folgeverspätungen und Nennleistungen

Fahrzeitveränderung – Beschleunigung – geringere Beschleunigung auf 100 km/h

Variation	Wert [%]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Anfahr- zugkraft	100	4,11	1,64	147	147,76
	95	4,12	1,64	146	147,57
	90	4,14	1,64	145	147,13
	85	4,16	1,65	144	145,79

Fahrzeitveränderung – Beschleunigung – geringere Beschleunigung auf 80 km/h

Variation	Wert [%]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Anfahr- zugkraft	100	4,92	1,96	123	123,86
	80	4,95	1,95	121	123,59
	75	4,97	1,97	121	122,34
	70	4,98	1,96	120	122,51
	65	5,02	1,99	120	120,67
	60	5,04	1,99	119	120,22
	55	5,07	2,00	118	119,16
	50	5,12	2,02	117	117,53

Fahrzeitveränderung – Beschleunigung – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) mit 2.160 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Höchst- geschwindigkeit	100	4,11	1,64	147	147,76
	95	4,22	1,67	142	143,15
	90	4,33	1,69	137	139,16
	85	4,44	1,71	132	135,13
	80	4,56	1,76	128	129,33
	75	4,69	1,80	124	124,44
	70	4,80	1,83	120	120,32

Fahrzeitveränderung – Beschleunigung – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) mit 1.080 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Höchst- geschwindigkeit	100	3,77	1,50	159	162,13
	95	3,90	1,54	153	154,97
	90	4,03	1,58	147	148,29
	85	4,14	1,60	141	143,55
	80	4,27	1,64	136	137,55
	75	4,37	1,66	131	133,29
	70	4,50	1,70	127	128,02

Fahrzeitveränderung – Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen mit 2.160 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Höchst- geschwindigkeit	105	3,67	1,42	169	170,73
	100	3,81	1,49	156	163,19
	80	4,34	1,66	134	136,19

Fahrzeitveränderung – Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen mit 1.080 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Höchst- geschwindigkeit	120	3,52	1,39	179	180,65
	100	3,64	1,44	165	168,02
	80	4,16	1,60	140	140,42

Fahrzeitveränderung – Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) mit 2.160 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{Wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Höchst- geschwindigkeit	100	3,81	1,49	156	163,19
	95	3,96	1,56	151	153,39
	90	4,09	1,60	144	146,81
	85	4,21	1,62	140	142,60
	80	4,34	1,66	134	136,19
	75	4,45	1,68	129	131,96
	70	4,57	1,73	125	126,02

Fahrzeitveränderung – Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) mit 1.080 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{Wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Höchst- geschwindigkeit	100	3,64	1,44	165	168,02
	95	3,77	1,49	158	159,82
	90	3,90	1,52	151	153,41
	85	4,03	1,55	145	147,52
	80	4,16	1,60	140	140,42
	75	4,25	1,60	134	137,24
	70	4,37	1,64	130	131,71

Fahrzeitveränderung – Auslaufen – Auslaufen nutzen mit 2.160 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Ziel- geschwindigkeit	100	3,84	1,53	157	159,33
	95	3,84	1,53	157	159,09
	90	3,85	1,54	157	158,06
	85	3,87	1,55	157	157,04
	80	3,87	1,55	156	156,61
	75	3,89	1,55	155	156,17
	70	3,91	1,55	154	155,73

Fahrzeitveränderung – Auslaufen – Auslaufen nutzen mit 1.080 t

Variation	Wert [km/h]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
Ziel- geschwindigkeit	100	3,63	1,44	165	168,58
	95	3,64	1,44	165	166,26
	90	3,64	1,45	165	167,41
	85	3,66	1,46	165	166,26
	80	3,67	1,47	165	165,13
	75	3,68	1,46	163	165,38
	70	3,70	1,48	163	163,14

Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung

Variation	Wert [%]	\bar{z} [min]	t_{wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
aus 100 km/h	100	3,89	1,52	153	159,79
aus 50 km/h	50	3,96	1,57	152	154,17
aus 80 km/h	100	4,76	1,88	126	129,22
aus 40 km/h	50	4,81	1,90	125	127,32

Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben und harmonisieren (kein Runtersignalisieren)

Szenario	v_{\max} [km/h]	\bar{z} [min]	t_{Wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
1	100	4,19	1,67	144	145,36
2	80	4,66	1,79	125	127,15
3	90	4,20	1,66	143	145,82

Geschwindigkeitsprofil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung

Maßnahme	$v_{\max} / v_{\text{Ende}}$ [km/h]	\bar{z} [min]	t_{Wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
-	100 / 100	3,81	1,49	156	163,19
Beharren	95 / 95	3,96	1,56	151	153,56
Auslaufen	100 / 70	3,91	1,55	154	155,56

Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots

Anzahl Züge [-]	v_{\max} [km/h]	\bar{z} [min]	t_{Wm} [min]	Summe Züge [-]	Nennleistung [-]
156	100	3,81	1,49	156	163,19
155		3,81	1,47	155	164,96
156		3,81	1,49	156	163,18
157		3,82	1,51	157	161,44

Anlage 11: Änderung des Wagenzuges – nur leise und neue Wagen...

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
19	Kapitalkosten	8.276,90
	Instandhaltungskosten EVU	4.367,30
	Personalkosten EVU	0,00
	Sachkosten EVU	0,00
	Instandhaltungskosten EIU	0,00
	Gesamtkosten pro Tag	12.644,20
38	Kapitalkosten	6.699,30
	Instandhaltungskosten EVU	3.534,90
	Personalkosten EVU	0,00
	Sachkosten EVU	0,00
	Instandhaltungskosten EIU	0,00
	Gesamtkosten pro Tag	10.234,20
48	Kapitalkosten	4.377,20
	Instandhaltungskosten EVU	2.309,60
	Personalkosten EVU	0,00
	Sachkosten EVU	0,00
	Instandhaltungskosten EIU	0,00
	Gesamtkosten pro Tag	6.686,80
58	Kapitalkosten	3.399,40
	Instandhaltungskosten EVU	1.793,70
	Personalkosten EVU	0,00
	Sachkosten EVU	0,00
	Instandhaltungskosten EIU	0,00
	Gesamtkosten pro Tag	5.193,10

Nennleistung

unverändert

Schallpegel

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
2		2	34	111,96	-0,16
3		4	32	111,78	-0,34
4		6	30	111,61	-0,51
5		8	28	111,42	-0,70
6		10	26	111,23	-0,89
7		12	24	111,02	-1,10
8		14	22	110,81	-1,31
9		16	20	110,59	-1,53
10		18	18	110,35	-1,77
11		20	16	110,10	-2,02
12		22	14	109,84	-2,28
13		24	12	109,55	-2,57
14		26	10	109,25	-2,87
15		28	8	108,93	-3,19
16		30	6	108,57	-3,55
17		32	4	108,20	-3,92
18		34	2	107,78	-4,34
19		36	0	107,31	-4,81

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
20	80	0	36	110,88	-
21		2	34	110,72	-0,16
22		4	32	110,54	-0,33
23		6	30	110,37	-0,51
24		8	28	110,18	-0,69
25		10	26	109,99	-0,89
26		12	24	109,78	-1,09
27		14	22	109,57	-1,31
28		16	20	109,35	-1,53
29		18	18	109,12	-1,76
30		20	16	108,87	-2,01
31		22	14	108,60	-2,28
32		24	12	108,32	-2,55
33		26	10	108,02	-2,85
34		28	8	107,70	-3,18
35		30	6	107,36	-3,52
36		32	4	106,97	-3,90
37		34	2	106,56	-4,32
38		36	0	106,10	-4,78

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
39	100	0	18	109,15	-
40		2	16	108,82	-0,33
41		4	14	108,46	-0,69
42		6	12	108,07	-1,08
43		8	10	107,64	-1,51
44		10	8	107,15	-2,00
45		12	6	106,62	-2,54
46		14	4	106,00	-3,15
47		16	2	105,29	-3,87
48		18	0	104,43	-4,73

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
49	80	0	18	107,92	-
50		2	16	107,58	-0,33
51		4	14	107,23	-0,69
52		6	12	106,84	-1,08
53		8	10	106,41	-1,51
54		10	8	105,93	-1,99
55		12	6	105,40	-2,52
56		14	4	104,79	-3,13
57		16	2	104,08	-3,84
58		18	0	103,23	-4,69

Anlage 12: Fahrzeitveränderung – Beschleunigen – geringere Beschleunigung

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
4	Kapitalkosten	6.258,50
	Instandhaltungskosten EVU	865,40
	Personalkosten EVU	294,20
	Sachkosten EVU	-1.644,60
	Instandhaltungskosten EIU	-56,10
	Gesamtkosten pro Tag	5.717,40
15	Kapitalkosten	8.935,30
	Instandhaltungskosten EVU	2.277,80
	Personalkosten EVU	294,20
	Sachkosten EVU	-1.644,60
	Instandhaltungskosten EIU	-56,10
	Gesamtkosten pro Tag	9.806,60
33	Kapitalkosten	2.538,80
	Instandhaltungskosten EVU	352,50
	Personalkosten EVU	127,20
	Sachkosten EVU	-2.867,90
	Instandhaltungskosten EIU	-135,70
	Gesamtkosten pro Tag	14,90
44	Kapitalkosten	3.608,60
	Instandhaltungskosten EVU	916,90
	Personalkosten EVU	127,20
	Sachkosten EVU	-2.867,90
	Instandhaltungskosten EIU	-135,70
	Gesamtkosten pro Tag	1.649,10

Nennleistung

Modellzugnummer	Beschleunigen auf [km/h]	Anzahl SGV [-]	Nennleistung [-]
1 = 12	100	58,8	147,76
4 = 15	92	55,8	145,79
23 = 34	80	49,2	123,86
33 = 44	41	43,2	117,53

Schallpegel

Modellzugnummer	Anfahrzugkraft [%]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Beschleunigen auf [km/h]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	100	112,12	-
4				92	111,63	-0,49
	85				111,62	-0,50
12	100	36	0	100	107,31	-
15				92	106,83	-0,48
	85				106,80	-0,51
23	100	0	36	80	110,88	-
33				41	108,11	-2,77
	50				108,04	-2,84
34	100	36	0	80	106,10	-
44				41	103,49	-2,61
	50				103,29	-2,81

Anlage 13: Fahrzeitveränderung – Beschleunigen – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
7	Kapitalkosten	8.073,90
	Instandhaltungskosten EVU	1.121,70
	Personalkosten EVU	409,10
	Sachkosten EVU	-3.308,30
	Instandhaltungskosten EIU	-406,30
	Gesamtkosten pro Tag	5.890,10
21	Kapitalkosten	4.897,90
	Instandhaltungskosten EVU	706,00
	Personalkosten EVU	431,40
	Sachkosten EVU	-1.925,40
	Instandhaltungskosten EIU	-316,70
	Gesamtkosten pro Tag	3.793,20

Nennleistung

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
1 = 8	100	58,8	147,76
2 = 9	95	53,8	143,15
3 = 10	90	48,8	139,16
4 = 11	85	43,8	135,13
5 = 12	80	39,8	129,33
6 = 13	75	35,8	124,44
7 = 14	70	31,8	120,32

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
15 = 22	100	63,6	162,13
16 = 23	95	57,6	154,97
17 = 24	90	51,6	148,29
18 = 25	85	45,6	143,55
19 = 26	80	40,6	137,55
20 = 27	75	35,6	133,29
21 = 28	70	31,6	128,02

Schallpegel

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
2	95			111,82	-0,30
3	90			111,51	-0,61
4	85			111,20	-0,92
5	80			110,88	-1,24
6	75			110,55	-1,57
7	70			110,22	-1,90

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
8	100	36	0	107,31	-
9	95			107,01	-0,30
10	90			106,71	-0,60
11	85			106,41	-0,90
12	80			106,10	-1,22
13	75			105,78	-1,53
14	70			105,46	-1,85

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
15	100	0	18	109,15	-
16	95			108,85	-0,30
17	90			108,55	-0,60
18	85			108,23	-0,92
19	80			107,92	-1,24
20	75			107,59	-1,56
21	70			107,26	-1,89

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
22	100	18	0	104,43	-
23	95			104,13	-0,30
24	90			103,83	-0,60
25	85			103,53	-0,90
26	80			103,23	-1,20
27	75			102,92	-1,51
28	70			102,60	-1,83



Anlage 14: Fahrzeitveränderung – Beharren – Höchstgeschwindigkeit (v_{\max}) ausnutzen

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
15	Kapitalkosten	-10.037,80
	Instandhaltungskosten EVU	-1.393,20
	Personalkosten EVU	-501,00
	Sachkosten EVU	3.116,70
	Instandhaltungskosten EIU	302,40
	Gesamtkosten pro Tag	-8.512,90
35	Kapitalkosten	-6.112,40
	Instandhaltungskosten EVU	-878,60
	Personalkosten EVU	-525,30
	Sachkosten EVU	1.888,90
	Instandhaltungskosten EIU	231,40
	Gesamtkosten pro Tag	-5.396,00

Nennleistung

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
1 = 6	100	62,4	163,19
2 = 7	105	75,4	170,73
11 = 16	80	40,4	136,19
15 = 20	100	62,4	163,19
21 = 26	100	66	168,02
25 = 30	120	80	180,65
31 = 36	80	41	140,42
35 = 40	100	66	168,02

Schallpegel

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
2	105			112,41	0,29
3	110			112,70	0,58
4	115			112,99	0,87
5	120			113,27	1,15
6	100	36	0	107,31	-
7	105			107,60	0,29
8	110			107,89	0,58
9	115			108,17	0,86
10	120			108,44	1,13

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
11	80	0	36	110,88	-
12	85			111,20	0,32
13	90			111,51	0,63
14	95			111,82	0,94
15	100			112,12	1,24
16	80	36	0	106,10	-
17	85			106,41	0,31
18	90			106,71	0,61
19	95			107,01	0,91
20	100			107,31	1,22

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
21	100	0	18	119,15	-
22	105			109,45	0,30
23	110			109,74	0,59
24	115			110,02	0,87
25	120			110,30	1,15
26	100	18	0	104,43	-
27	105			104,71	0,28
28	110			105,00	0,57
29	115			105,28	0,85
30	120			105,55	1,12

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
31	80	0	18	107,92	-
32	85			108,23	0,31
33	90			108,55	0,63
34	95			108,85	0,93
35	100			109,15	1,24
36	80	18	0	103,23	-
37	85			103,53	0,30
38	90			103,83	0,60
39	95			104,13	0,90
40	100			104,43	1,20



Anlage 15: Fahrzeitveränderung – Beharren – geringere Höchstgeschwindigkeit (v_{\max})

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
7	Kapitalkosten	8.688,90
	Instandhaltungskosten EVU	1.208,70
	Personalkosten EVU	448,80
	Sachkosten EVU	2.251,40
	Instandhaltungskosten EIU	-454,80
	Gesamtkosten pro Tag	12.143,00
21	Kapitalkosten	4.952,90
	Instandhaltungskosten EVU	713,90
	Personalkosten EVU	436,00
	Sachkosten EVU	1.272,70
	Instandhaltungskosten EIU	-340,90
	Gesamtkosten pro Tag	7.034,60

Nennleistung

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
1 = 8	100	62,4	163,19
2 = 9	95	57,4	153,39
3 = 10	90	51,4	146,81
4 = 11	85	46,4	142,60
5 = 12	80	40,4	136,19
6 = 13	75	35,4	131,96
7 = 14	70	31,4	126,02

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
15 = 22	100	66	168,02
16 = 23	95	59	159,82
17 = 24	90	52	153,41
18 = 25	85	46	147,52
19 = 26	80	41	140,42
20 = 27	75	35	137,24
21 = 28	70	31	131,71

Schallpegel

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
2	95			111,82	-0,30
3	90			111,51	-0,61
4	85			111,20	-0,92
5	80			110,88	-1,24
6	75			110,55	-1,57
7	70			110,22	-1,90

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
8	100	36	0	107,31	-
9	95			107,01	-0,30
10	90			106,71	-0,60
11	85			106,41	-0,90
12	80			106,10	-1,22
13	75			105,78	-1,53
14	70			105,46	-1,85

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
15	100	0	18	109,15	-
16	95			108,85	-0,30
17	90			108,55	-0,60
18	85			108,23	-0,92
19	80			107,92	-1,24
20	75			107,59	-1,56
21	70			107,26	-1,89

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
22	100	18	0	104,43	-
23	95			104,13	-0,30
24	90			103,83	-0,60
25	85			103,53	-0,90
26	80			103,23	-1,20
27	75			102,92	-1,51
28	70			102,60	-1,83



Anlage 16: Fahrzeitveränderung – Auslaufen – Auslaufen nutzen

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
7	Kapitalkosten	986,90
	Instandhaltungskosten EVU	137,20
	Personalkosten EVU	50,40
	Sachkosten EVU	-2.904,20
	Instandhaltungskosten EIU	-73,40
	Gesamtkosten pro Tag	-1.803,10
21	Kapitalkosten	595,70
	Instandhaltungskosten EVU	86,40
	Personalkosten EVU	55,50
	Sachkosten EVU	-1.610,30
	Instandhaltungskosten EIU	-41,20
	Gesamtkosten pro Tag	-913,90

Nennleistung

Modellzugnummer	Zielgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
1 = 8	100	62,4	161,06
2 = 9	95	63,4	159,09
3 = 10	90	63,4	158,06
4 = 11	85	63,4	157,04
5 = 12	80	62,4	156,61
6 = 13	75	61,4	156,17
7 = 14	70	60,4	155,73

Modellzugnummer	Zielgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
15 = 22	100	66	168,58
16 = 23	95	67	166,69
17 = 24	90	66	167,41
18 = 25	85	66	166,26
19 = 26	80	66	165,13
20 = 27	75	64	165,38
21 = 28	70	64	163,14

Schallpegel

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
2	95			111,82	-0,30
3	90			111,51	-0,61
4	85			111,20	-0,92
5	80			110,88	-1,24
6	75			110,55	-1,57
7	70			110,22	-1,90

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
8	100	36	0	107,31	-
9	95			107,01	-0,30
10	90			106,71	-0,60
11	85			106,41	-0,90
12	80			106,10	-1,22
13	75			105,78	-1,53
14	70			105,46	-1,85

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
15	100	0	18	109,15	-
16	95			108,85	-0,30
17	90			108,55	-0,60
18	85			108,23	-0,92
19	80			107,92	-1,24
20	75			107,59	-1,56
21	70			107,26	-1,89

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
22	100	18	0	104,43	-
23	95			104,13	-0,30
24	90			103,83	-0,60
25	85			103,53	-0,90
26	80			103,23	-1,20
27	75			102,92	-1,51
28	70			102,60	-1,83



Anlage 17: Fahrzeitveränderung – Bremsen – geringere Beschleunigung

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
11	Kapitalkosten	938,60
	Instandhaltungskosten EVU	127,40
	Personalkosten EVU	53,20
	Sachkosten EVU	-475,60
	Instandhaltungskosten EIU	-18,60
	Gesamtkosten pro Tag	625,00
33	Kapitalkosten	586,50
	Instandhaltungskosten EVU	80,20
	Personalkosten EVU	31,10
	Sachkosten EVU	-215,60
	Instandhaltungskosten EIU	-19,20
	Gesamtkosten pro Tag	463,00

Nennleistung

Modellzugnummer	Bremsen aus [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
1 = 12	100	61,2	159,79
11 = 22	100	60,2	154,17
23 = 34	80	50,4	129,22
33 = 44	80	49,4	127,32

Schallpegel

Modellzugnummer	Bremskraft [%]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Bremsen aus [km/h]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	100	112,12	-
11				50	108,80	-3,32
	12	100	36	0	100	107,31
22	50				104,11	-3,20
	23	100	0	36	80	110,88
33	50				108,04	-2,84
	34	100	36	0	80	106,10
44	50				103,42	-2,68
					40	103,42

Anlage 18: Geschwindigkeitsprofil – schallarmes Geschwindigkeitsprofil vorgeben ...

Kosten

Modellzugnummer	Kostenart [-]	Betrag [€]
20	Kapitalkosten	5.875,00
	Instandhaltungskosten EVU	807,60
	Personalkosten EVU	294,10
	Sachkosten EVU	-2.658,50
	Instandhaltungskosten EIU	-268,50
	Gesamtkosten pro Tag	4.049,70
39	Kapitalkosten	136,70
	Instandhaltungskosten EVU	19,30
	Personalkosten EVU	4,80
	Sachkosten EVU	-4.754,30
	Instandhaltungskosten EIU	-18,80
	Gesamtkosten pro Tag	-4.612,30

Nennleistung

Modellzugnummer	v_{\max} [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
20	80	38,6	127,15
39	90	56,6	145,82

Schallpegel

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
1	100	0	36	112,12	-
2		2	34	111,96	-0,16
3		4	32	111,78	-0,34
4		6	30	111,61	-0,51
5		8	28	111,42	-0,70
6		10	26	111,23	-0,89
7		12	24	111,02	-1,10
8		14	22	110,81	-1,31
9		16	20	110,59	-1,53
10		18	18	110,35	-1,77
11		20	16	110,10	-2,02
12		22	14	109,84	-2,28
13		24	12	109,55	-2,57
14		26	10	109,25	-2,87
15		28	8	108,93	-3,19
16		30	6	108,57	-3,55
17		32	4	108,20	-3,92
18		34	2	107,78	-4,34
19		36	0	107,31	-4,81

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
20	80	0	36	110,88	-
21		2	34	110,72	-0,16
22		4	32	110,54	-0,33
23		6	30	110,37	-0,51
24		8	28	110,18	-0,69
25		10	26	109,99	-0,89
26		12	24	109,78	-1,09
27		14	22	109,57	-1,31
28		16	20	109,35	-1,53
29		18	18	109,12	-1,76
30		20	16	108,87	-2,01
31		22	14	108,60	-2,28
32		24	12	108,32	-2,55
33		26	10	108,02	-2,85
34		28	8	107,70	-3,18
35		30	6	107,36	-3,52
36		32	4	106,97	-3,90
37		34	2	106,56	-4,32
38		36	0	106,10	-4,78

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
39	90	0	36	111,51	-
40		2	34	111,35	-0,16
41		4	32	111,18	-0,33
42		6	30	111,00	-0,51
43		8	28	110,82	-0,69
44		10	26	110,62	-0,89
45		12	24	110,42	-1,09
46		14	22	110,20	-1,31
47		16	20	109,98	-1,53
48		18	18	109,74	-1,77
49		20	16	109,49	-2,02
50		22	14	109,23	-2,28
51		24	12	108,95	-2,56
52		26	10	108,65	-2,86
53		28	8	108,32	-3,19
54		30	6	107,97	-3,54
55		32	4	107,60	-3,91
56		34	2	107,18	-4,33
57		36	0	106,71	-4,80

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
58	100	0	18	109,15	-
59		2	16	108,82	-0,33
60		4	14	108,46	-0,69
61		6	12	108,07	-1,08
62		8	10	107,64	-1,51
63		10	8	107,15	-2,00
64		12	6	106,62	-2,54
65		14	4	106,00	-3,15
66		16	2	105,29	-3,87
67		18	0	104,43	-4,73

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
68	80	0	18	107,92	-
69		2	16	107,58	-0,33
70		4	14	107,23	-0,69
71		6	12	106,84	-1,08
72		8	10	106,41	-1,51
73		10	8	105,93	-2,00
74		12	6	105,40	-2,54
75		14	4	104,79	-3,15
76		16	2	104,08	-3,87
77		18	0	103,23	-4,73

Modellzugnummer	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
78	90	0	18	108,55	-
79		2	16	108,21	-0,34
80		4	14	107,85	-0,70
81		6	12	107,47	-1,08
82		8	10	107,04	-1,51
83		10	8	106,56	-1,99
84		12	6	106,02	-2,53
85		14	4	105,40	-3,15
86		16	2	104,69	-3,86
87		18	0	103,83	-4,72



Anlage 19: Geschwindigkeitsprofil – Weiterentwicklung der Zuglaufregelung

Kosten

Maßnahme	Kostenart [-]	Betrag [€]
Beharren	Kapitalkosten	2.012,70
	Instandhaltungskosten EVU	275,20
	Personalkosten EVU	106,50
	Sachkosten EVU	-762,80
	Instandhaltungskosten EIU	-69,60
	Gesamtkosten pro Tag	1.562,00
Auslaufen	Kapitalkosten	986,90
	Instandhaltungskosten EVU	137,20
	Personalkosten EVU	50,40
	Sachkosten EVU	-2.904,20
	Instandhaltungskosten EIU	-73,40
	Gesamtkosten pro Tag	-1.803,10

Nennleistung

Maßnahme	$v_{\max} / v_{\text{Ende}}$ [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
Beharren	95 / 95	57,4	153,56
Auslaufen	100 / 70	60,4	155,56

Schallpegel

Maßnahme	v_{Ende} [km/h]	Anzahl leiser Wagen [-]	Anzahl lauter Wagen [-]	Schallpegel [dB(A)]	Delta Schallpegel [dB(A)]
keine	100	0	36	112,12	-
Beharren	95			111,82	-0,3
Auslaufen	70			110,22	-1,9



Anlage 20: Umleitung – Umfahren von Lärmhotspots

Kosten

Maßnahme	Kostenart [-]	Betrag [€]
Ausgangsstrecke (Anzahl SGV = 61,4)	Kapitalkosten	-40,60
	Instandhaltungskosten EVU	-4,80
	Personalkosten EVU	-5,30
	Sachkosten EVU	-
	Instandhaltungskosten EIU	-18,60
	Gesamtkosten pro Tag	-69,23
Umleitungstrecke (Anzahl SGV = 63,4)	Kapitalkosten	41,70
	Instandhaltungskosten EVU	4,90
	Personalkosten EVU	5,40
	Sachkosten EVU	-
	Instandhaltungskosten EIU	9,80
	Gesamtkosten pro Tag	61,80
Umleitungstrecke zu Ausgangsstrecke (Anzahl SGV = 1)	Kapitalkosten	172,70
	Instandhaltungskosten EVU	23,00
	Personalkosten EVU	11,60
	Sachkosten EVU	89,60
	Instandhaltungskosten EIU	-8,80
	Gesamtkosten pro Tag	288,10

Nennleistung

Maßnahme	v_{\max} SGV [km/h]	Anzahl SGV	Nennleistung
Ausgangsstrecke	100	62,4	163,18
		61,4	164,96
Umleitungstrecke	100	62,4	163,18
		63,4	161,44



Anlage 21: Steckbriefe der realen Strecken

Koblenz Hbf ↔ Budenheim (Streckennummern: 2630/3510)

Richtung	Budenheim	Koblenz Hbf
Streckenlänge [km]	≈ 84	≈ 84
Maximale Steigung [‰]	6,9	7,1
Maximales Gefälle [‰]	7,1	7,1
Zul. Geschwindigkeit SGV [km/h]	100	100
Fahrzeit SGV [min]	≈ 55	≈ 55
Tunnellänge [km]	0,892	0,892
Elektrifiziert	ja	ja
Streckenklasse	D4	D4

Eltville ↔ Niederlahnstein (Streckennummern: 3507)

Richtung	Niederlahnstein	Eltville
Streckenlänge [km]	≈ 75	≈ 75
Maximale Steigung [‰]	7,2	6,6
Maximales Gefälle [‰]	6,7	6,9
Zul. Geschwindigkeit SGV [km/h]	100	100
Fahrzeit SGV [min]	≈ 50	≈ 50
Tunnellänge [km]	0,825	0,796
Elektrifiziert	ja	ja
Streckenklasse	D4	D4

Bebra ↔ Fulda (Streckennummer: 3600)

Richtung	Fulda	Bebra
Streckenlänge [km]	≈ 56	≈ 56
Maximale Steigung [‰]	9,4	11,5
Maximales Gefälle [‰]	11,8	9,5
Zul. Geschwindigkeit SGV [km/h]	100	100
Fahrzeit SGV [min]	≈ 37	≈ 37
Tunnellänge [km]	0,238	0,238
Elektrifiziert	ja	ja
Streckenklasse	D4	D4

Nürnberg Hbf ↔ Regensburg Hbf (Streckennummer: 5850)

Richtung	Regensburg Hbf	Nürnberg Hbf
Streckenlänge [km]	≈ 100	≈ 100
Maximale Steigung [‰]	12,5	12,32
Maximales Gefälle [‰]	12,72	12,5
Zul. Geschwindigkeit SGV [km/h]	100	100
Fahrzeit SGV [min]	≈ 64	≈ 64
Tunnellänge [km]	0,010	0,010
Elektrifiziert	ja	ja
Streckenklasse	D4	D4

Schriftenverzeichnis

Publikationen und Beiträge des Verfassers oder unter Mitwirkung des Verfassers zur Zeit seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik:

Oetting, Andreas, Sören Griese und Yigit Fidansoy (2017). „Konsistente Infrastruktur- und Zugmodellierung für makroskopische Untersuchungen“. In: Deine Bahn (05/2017) pp. 20-25. ISSN: 0948-7263

Oetting, Andreas und Sören Griese (2016). „Entwicklung von Algorithmen für die Fahr- und Mindestzugfolgezeitenrechnung für Strecken“. In: 25. VWT - Verkehrswissenschaftliche Tage 2016, Dresden.

Oetting, Andreas, Sören Griese, Anna-Katharina Keck u. a. (2014): „Strategien und Perspektiven zur Senkung des Verkehrslärms“. In: Internationales Verkehrswesen, 66 (3) pp. 117-118. ISSN 0020-9511

Streitzig, Constanze, Sebastian Schön, Sören Griese u. a. (2013): „Practical Education of Young Academics for Railway Operation and Research“. (Online-Edition: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4349>) In: Euro - Žel 2013., 240–245. ISBN 978-80-263-0380-0



Studentische Arbeiten

Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten, die unter Anleitung des Verfassers am oder in Kooperation mit dem Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik durchgeführt wurden:

Palmer, Lasse (2016). „Entwicklung einer Berechnungsmethode für die zusätzlichen Kosten bei veränderter Zugfahrt“. Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Yakovleva, Evgeniya (2016). „Optimierung eines Ablaufprozesses in der Bereitstellung“. Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Schmuck, Stefan (2015). „Vorbereitung einer Simulation von ETCS Level 2 im EBD“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Rudolphi, Timo (2014). „Betriebskonzepte zur Lärminderung“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Jähnert, Dietrich (2014). „Übertragbarkeit von Fahrplankonzepten für Baumaßnahmen bei Fahrplanveränderungen“. Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Willsch, Sebastian (2013). „Messung der Informationsquantität am Beispiel der Reisendeninformation“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Linder, Sarah (2012). „Untersuchung der ökologischen Effekte von längeren Güterzügen“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Tedesco, Vincenzo (2012). „Kommunikationsprozesse in der intermodalen Anschlussdisposition“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.



In der Schriftenreihe der Institute für Verkehr, Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik (ISSN 1614-9300) sind folgende Bände erschienen:

Stelzer, Anselmo (2016). *Automatisierte Konfliktbewertung und -lösung für die Anschlussdisposition im (Schienen-)Personenverkehr*. Bd. B10. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Chu, Friederike (2014). *Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhaltens: Am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs*. Bd. B 9. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Pächer, Martin (2007). *Pünktlichkeitsbewertung im Straßenbahn- und Stadtbahnverkehr*. Bd. B 8. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Frensch, Michael (2005). *Ermittlung von wirtschaftlich und betrieblich optimalen Fahrzeugkonzepten für den Einsatz im Regionalverkehr*. Bd. B 7. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Axthelm, Carolin (2005). *Kriminalität im Schienenverkehr in Ballungsräumen*. Bd. B 6. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Becker, Josef (2005). *Qualitätsbewertung und Gestaltung von Stationen des regionalen Bahnverkehrs*. Bd. B 5. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Muthmann, Thilo (2004). *Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung*. Bd. B 4. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Axthelm, Carolin (2004). *Umweltbahnhof Rheinland-Pfalz*. Bd. B 3. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Becker, Josef und Elke Schramm (2003). *Barrierefreier Schienenpersonennahverkehr*. Beschreibung und Bewertung der Anforderungen mobilitätseingeschränkter Menschen. Bd. B 2. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.

Lademann, Frank (2001). *Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken*. Bd. B 1. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.